

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Návrh koncepce SMART GRIDS s využitím
simulačních nástrojů**

Design of SMART GRID Conception with Using SW Tools

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Vít Kryl

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Návrh koncepce SMART GRIDS s využitím simulačních nástrojů
Design of SMART GRID Conception with Using SW Tools

Zásady pro vypracování:

1. Analýza zpětných vlivů OZE na distribuční soustavu
2. Návrh koncepce a vývoj matematického modelu vymezené energetické soustavy v prostředí ATPDraw pro požadavky SMART GRIDS
3. Analýza toku výkonu a vybraných energetických parametrů ve vymezené soustavě
4. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ATP – EMTP: Beginner`s guide, 2000
- [2] Van der Sluis, L.: Transients in power systems, John Wiley & Sons Ltd., ISBN 0-471-48639-6, England, 2001.
- [3] Trojánek, Z. a kol.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL, Praha 1987
- [4] Toman, P., Mišák, S., Drápela, J.: Provoz distribučních soustav, ČVUT, 2011, ISBN 978-80-01-04935-8
- [5] Mastný, P., Mišák, S., Drápela, J.: Obnovitelné zdroje energie, mČVUT, 2011, ISBN 978-80-01-04937-2
- [6] Mišák, S., Prokop, L., Sikora, T.: Provoz větrných elektráren s měniči frekvence, časopis ELEKTRO 10/2008
- [7] Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 4, 2011

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

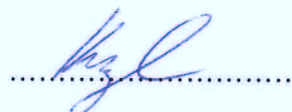


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Zároveň bych chtěl na tomto místě poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Stanislavu Mišákovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky k mé práci a poskytnutou literaturu. Dále bych chtěl poděkovat Lence Holé a Ing. Mariánu Uherovi za podněty a rady při jejím zpracování a svým nejbližším za podporu během celé doby mého studia.

7. 5. 2014



ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na analýzu vybraných energetických parametrů ve vymezené soustavě Smart Grids pro připojení fotovoltaické elektrárny. Obsahuje seznámení se současnou problematikou elektrizační soustavy a systémem Smart Grids, s fotovoltaickou elektrárnou a analýzou zpětných vlivů obnovitelných zdrojů energie na distribuční soustavu. V rámci této práce je proveden návrh a vývoj matematického modelu v grafickém prostředí ATPDraw programu ATP-EMTP. Dále je věnována analýze toku výkonu a vybraných energetických parametrů při zakomponování fotovoltaické elektrárny do systému Smart Grids.

KLÍČOVÁ SLOVA: obnovitelné zdroje energie, elektrizační soustava, zpětné vlivy, Smart Grids, ATPDraw, fotovoltaická elektrárna

ABSTRACT

This thesis is focused on the analysis of selected energy parameters at the defined system Smart Grids for connecting photovoltaic power plant. It includes introduction presenting problems of the power system and the system of Smart Grids, with photovoltaic power plant and analysis negative back influences of renewable energy sources to the grid. One part of this work is make the design and development of a mathematical model in a graphical environment ATPDraw the ATP-EMTP. Furthermore it is focused on the analysis of the flow of power and energy parameters selected in the integration of photovoltaic power plant in the Smart Grids.

KEY WORDS: renewable energy sources, power system, negative back influences, Smart Grids, ATPDraw, photovoltaic power plant

OBSAH

ÚVOD	11 -
1. ZPĚTNÉ VLIVY OZE NA DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY	12 -
1.1 Elektrizační soustava.....	12 -
1.2 Smart Grids	14 -
1.2.1 Inteligentní síť	14 -
1.2.2 Akumulace elektrické energie	15 -
1.2.3 Elektromobilita.....	15 -
1.3 Fotovoltaická elektrárna	16 -
1.3.1 Princip funkce fotovoltaického článku.....	16 -
1.3.2 Komponenty fotovoltaických systémů.....	19 -
1.3.3 Zapojení fotovoltaických systémů	21 -
1.4 Zpětné vlivy na napájecí síť	24 -
1.4.1 Změna napětí	25 -
1.4.2 Proudby harmonických a mezipharmonických	25 -
1.4.3 Ovlivnění zařízení HDO.....	28 -
2. MATEMATICKÝ MODEL VYMEZENÉ SOUSTAVY	30 -
2.1 Fotovoltaická elektrárna	31 -
2.2 Jednotlivé komponenty v síti.....	33 -
2.2.1 Zdroj	33 -
2.2.2 Vedení	34 -
2.2.3 Transformátory.....	38 -
2.3 Diagram zatížení	39 -
3. ANALÝZA TOKU VÝKONU A VYBRANÝCH PARAMETRŮ	41 -
3.1 Analýza ustáleného chodu soustavy.....	41 -
3.1.1 Analýza ustáleného chodu soustavy bez připojené FVE	42 -
3.1.2 Analýza ustáleného chodu soustavy s připojenou FVE	43 -
3.2 Analýza vlivu FVE na vybrané parametry distribuční soustavy.....	44 -
3.2.1 Analýza napětí.....	44 -
3.2.2 Analýza toku výkonu	46 -
ZÁVĚR.....	50 -
Použitá literatura	52 -

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1 Výroba elektřiny v ČR roku 2001.....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 1.2 Výroba elektřiny v ČR roku 2012.....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 1.3 Schéma fotovoltaiického článku a princip činnosti.....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 1.4 Náhradní schéma fotovoltaiického článku.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 1.5 Voltampérová charakteristika fotovoltaiického článku.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 1.6 Vliv teploty na výkon fotovoltaiického článku.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 1.7 Vliv intenzity slunečního záření na výkon fotovoltaiického článku.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 1.8 Blokové schéma fotovoltaiické elektrárny připojeného k síti.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 1.9 Blokové schéma systému Grid-off.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 1.10 Zapojení systému pro vlastní spotřebu.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 1.11 Zapojení systému pro dodávku do sítě.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 1.12 Hybridní fotovoltaiický systém.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 2.1 Blokové schéma vymezené elektrizační soustavy.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 2.2 Výkonová křivka FVE.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 2.3 Výkonové poměry FVE v daném dni.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 2.4 Vybraný prvek pro FVE a nastavení jeho parametrů v ATPDraw.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 2.5 Vybraný prvek pro zdroj 110 kV a nastavení jeho parametrů v ATPDraw.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 2.6 Vybraný prvek pro vnitřní impedanci zdroje 110 kV a nast. jeho parametrů v ATPDraw.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 2.7 Vybraný prvek pro přenosové vedení 110 kV a nastavení jeho parametrů v ATPDraw.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 2.8 Nastavení parametrů a umístění vodičů AlFe6 185 v ATPDraw.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 2.9 Nosný stožár jednoduchý 110 kV.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 2.10 Vybraný prvek pro kabelové vedení 22 kV a nastavení jeho parametrů v ATPDraw.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 2.11 Vybraný prvek pro transformátory a nastavení jeho parametrů v ATPDraw.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 2.12 Typový diagram dodávky elektřiny.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 3.1 Hodnoty fázového napětí v OB bez připojené FVE.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 3.2 Činný výkon v PB1 bez připojené FVE.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 3.3 Hodnoty fázového napětí v OB s připojenou FVE.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 3.4 Činný výkon v PB1 s připojenou FVE.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 3.5 Poměry napětí v OB6.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 3.6 Vliv dodávaného výkonu na napěťovou změnu v místě připojení FVE.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 3.7 Poměry výkonů v PB1 s příspěvkem FVE.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 3.8 Srovnání výkonů v místě připojení FVE.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 3.9 Hodnoty činitele výkonu FVE během dne.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 3.10 PQ diagram FVE.....</i>	<i>48</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1.1 Vztažné proudy harm. pro výpočet max. emise výroben připojených do sítí nn</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 1.2 Vztažné proudy harm. pro výpočet max. emise výroben připojených do sítí vn.....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 1.3 Vztažné proudy harm. pro výpočet max. emise výroben připojených do sítí 110 kV</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 1.4 Podmínky pro připojení výrobní bez posouzení vlivu na signál HDO</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 2.1 Parametry zdroje 110 kV</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 2.2 Parametry přenosového vedení 110 kV.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 2.3 Parametry a umístění vodičů AlFe6 185</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 2.4 Parametry kabelů 22-AXEKCY 12,7/22 (25) kV.....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 2.5 Štítkové hodnoty transformátorů.....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 2.6 Hodnoty transformátorů získané z měření naprázdno a nakrátko</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 3.1 Hodnoty fázového napětí v OB a výkonu v PB1 bez připojené FVE</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 3.2 Hodnoty fázového napětí v OB a výkonu v PB1 s připojenou FVE</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 3.3 Hodnoty fázového napětí v OB6.....</i>	<i>45</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

I	Proud	(A)
I_D	Proud protékaný diodou	(A)
I_{k3}	Počáteční souměrný rázový zkratový proud	(A)
I_{mp}	Proud maximálního výkonu	(A)
I_p	Svodový proud	(A)
I_{PV}	Výstupní proud fotovoltaického článku	(A)
I_{SC}	Prou nakrátko	(A)
i_v	Vztažný proud	(A)
I_v	Přípustný proud	(A)
Q	Jalový výkon	(var)
P	Činný výkon	(W)
P_{in}	Výkon dopadajícího slunečního záření	(W)
P_{lt}	Dlouhodobá míra flikru	(-)
R_p	Svodový odpor	(Ω)
R_s	Sériový odpor	(Ω)
S_0	Rferenční výkon	(V·A)
S_A	Jmenovitý zdánlivý výkon výroby	(V·A)
S_{AV}	Plánovaný výkon	(V·A)
S_{kV}	Zkratový výkon sítě	(MV·A)
S_{nE}	Jmenovitý zdánlivý výkon výrobní jednotky	(V·A)
S_{nG}	Jmenovitý zdánlivý výkon generátoru	(V·A)
S_{rA}	Jmenovitý zdánlivý výkon celého zařízení	(V·A)
$\sin\psi_{kV}$	Sinus úhlu impedance soustavy v místě připojení	(-)
U	Napětí (fázové)	(V)
U_{0C}	Napětí naprázdno	(V)
U_j	Napětí (na diodě)	(V)
U_{mp}	Napětí maximálního výkonu	(V)
U_n	Jmenovité napětí	(V)
v	Řád harmonické	(-)
X	Reaktance	(Ω)
Z	Impedance	(Ω)
η	Účinnost	(%)
ΔU	Úbytek napětí (fázový)	(V)
ΔU_{Rs}	Úbytek napětí (na sériovém odporu)	(V)
nn	Nízké napětí	
vn	Vysoké napětí	
vvnn	Velmi vysoké napětí	
ES	Elektrizační soustava	
OZE	Obnovitelné zdroje energie	
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav	
DS	Distribuční soustava	
EU	Evropská unie	

FVE	Fotovoltaická elektrárna
HDO	Hromadné dálkové ovládání
OB	Odběrný bod
PB	Předávací bod
KB	Kontrolní bod
TDD	Typový diagram dodávky (elektřiny)

ÚVOD

Druh energie, na které je lidstvo od jisté doby závislé, a která nám v mnoha případech dodává určitý životní komfort, je elektrická energie. Výrobu, přenos, transformaci a distribuci této energie zprostředkovává elektrizační soustava (ES). Ta se skládá z elektráren, sítí a spotřebičů.

Tak jako populace, tak i spotřeba elektrické energie neustále roste. To vede k výstavbě dalších elektráren. Celosvětově je známo, že zásoby fosilních paliv se snižují a stav biosféry se zhoršuje. Česká republika jakožto člen Evropské unie se zavázala tyto problémy řešit a otevřela tím cestu k využívání obnovitelných zdrojů energie (OZE). Nemalou část těchto zdrojů tvoří zdroje s nestabilní charakteristikou z pohledu běžného časového měřítka. Jedná se hlavně o větrné a fotovoltaické elektrárny. Jelikož v České republice, jakožto státu bez velkých pohoří, budou v blízké budoucnosti téměř vyčerpána místa pro instalace větrných systémů, budoucnost se vidí ve fotovoltaických systémech. Proto je v této práci věnovaná pozornost pouze fotovoltaickým elektrárnám.

S rozvojem těchto zdrojů energie vzniká na základě nerovnoměrnosti jejich dodávky potřeba efektivně kompenzovat rozdíly v dodávané elektrické energii v závislosti na její spotřebě. Jedním způsobem podporovaným i Evropskou unií, který by mohl tento problém vyřešit a optimálně tak začlenit OZE do ES, je zavedení systému Smart Grids.

Samozřejmě tato inovace neodmyslitelně zasahuje do stávající struktury ES a nese sebou různé výhody i nevýhody, které také mohou být možností nebo dokonce výzvou k dalšímu vývoji. Vývoj může směřovat různými směry. Ale současné společenství si určilo cestu, která směřuje ke snižování emisí, zvyšuje spolehlivost, dává možnost volby, otevírá nové možnosti trhu atd. Jako vždy, až čas ukáže, jestli tento zvolený směr byl ten správný.

Cílem diplomové práce je vytvořit matematický model vymezené energetické soustavy konceptu Smart Grids a v něm analyzovat výkonové a napěťové poměry při připojení fotovoltaické elektrárny.

První část práce pojednává o zpětných vlivech OZE působících na distribuční soustavy. Obsahuje seznámení se současnou problematikou elektrizační soustavy a systémem SMART GRIDS. Dále je v ní popsán princip jednoho z vybraných OZE, a to fotovoltaické elektrárny, její součásti a možné způsoby připojení k elektrizační soustavě. Je zde ještě zmínka o analýze zpětných vlivů OZE, a tedy i FVE na distribuční soustavu podle PPDS. V druhé části je proveden návrh a vývoj matematického modelu v prostředí ATPDraw. Jsou zde popsány modely jak FVE, tak jednotlivých součástí soustavy a jejich patřičné nastavení. Třetí část je věnována analýze toku výkonu a vybraných energetických parametrů. Zaměřili jsme se na analýzu změny napětí v závislosti na změně výkonu bez připojené FVE do vymezené energetické soustavy a po jejím připojení.

Při zpracování diplomové práce jsem vycházel z předpisů provozu distribučních soustav, odporných publikací k tématu obnovitelné zdroje provoz distribučních soustav a manuálu programu ATPDraw.

Přínos diplomové práce je v možnosti namodelovat a analyzovat instalaci FVE do vymezené elektrizační soustavy a rozhodnout tak o jejím co nejefektivnějším připojení v rámci konceptu Smart Grids.

1. ZPĚTNÉ VLIVY OZE NA DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY

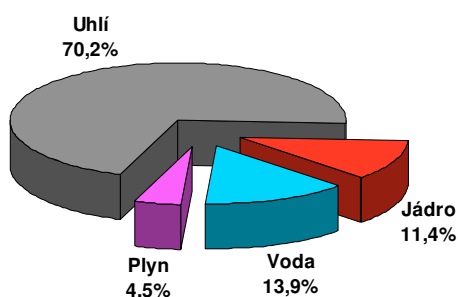
Na energetickém trhu v České republice se obnovitelné zdroje energie (OZE) objevily na začátku 21. století. Na základě státních dotací se hojně rozšiřovaly [11]. Pomineme-li jejich provoz v ostrovních systémech a uvažujeme-li provoz v distribuční soustavě (DS), tak jejich mohutný rozmach způsobuje značné problémy při zakomponování těchto zdrojů do DS, a to buď přímo, nebo přes sítě spotřebitelů. Od prvopočátku jsou DS navrhovány jako aktivní ve smyslu spotřeby, jenomže s OZE se stávají aktivními i ve smyslu výroby. Největším problémem je jejich kolísání výkonů a nepředvídatelná výroba elektrické energie. Úkolem OZE je poskytovat elektřinu zákazníkům s ohledem na životní prostředí a v souvislosti s distribuovanou výrobou levněji, efektivněji, při nižších celkových ztrátách, s využitím lokálních zdrojů atd. [5]. Zatím se ale vyznačují nízkou účinností a v kombinaci s kolísáním výkonu značně ovlivňují regulaci toku energie v DS. Současné DS nejsou v plné míře připravené na nějakou složitější regulaci, a proto se jejich dotace omezují, nebo úplně ruší [11]. Tyto problémy by mohl vyřešit v současné době se stále vyvíjející systém Smart Grids.

V této kapitole je popsán současný stav elektrizační soustavy a její aktuální problematika v návaznosti na OZE a koncept Smart Grids.

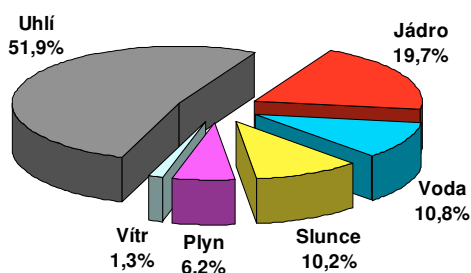
1.1 Elektrizační soustava

Současná elektrizační soustava (ES) zprostředkovává dodávku elektrické energie od výroby přes přenosové a distribuční systémy ke koncovým spotřebitelům. Celou ES můžeme rozdělit na tři části: výrobu, síť a spotřebiče [4].

Výroba zahrnuje velké systémové elektrárny s výkonem řádově stovek MW, ale také menší elektrárny a OZE s výkonem řádově desítek MW a méně [4]. Podíl energetických zdrojů na českém instalovaném výkonu na začátku nynějšího století je na obr. 1.1. Evropská unie se zavázala omezit emise skleníkových plynů, což znamenalo přechod na ekologicky čistá paliva a OZE. Velkorysá podpora, kterou OZE poskytla řada evropských zemí včetně České republiky, vyvolala nevídanou změnu energetických zdrojů v ES (obr. 1.2) [11].



Obr. 1.1 Výroba elektřiny v ČR roku 2001



Obr. 1.2 Výroba elektřiny v ČR roku 2012

Z výroby se elektrická energie distribuuje ke spotřebičům pomocí elektrických sítí. Sítě se rozděluje na přenosovou soustavu a distribuční soustavu. Přenosová (nadřazená) soustava tvoří základ ES. Je řešena okružním rozvodem, do kterého pracují tuzemské zdroje velkých výkonů, a také je propojená pomocí hraničních vedení se soustavami sousedních států. Tvoří ji sítě o napětí 400 kV a 220 kV. Na přenosovou soustavu navazuje distribuční soustava, která je oddělena transformační vazbou na napětí 110 kV. Distribuční soustavu tvoří několik napěťových úrovní od 110 kV až po sítě

nízkého napětí. Je řešena radiálním nebo okružním rozvodem a zapojují se do ní zdroje nižšího výkonu (distribuované zdroje). Distribuční soustava se dělí na soustavu 110kV, soustavu vysokého napětí (vn) a na soustavu nízkého napětí (nn). Jednotlivé distribuční soustavy jsou odděleny transformačními stanicemi. Distribuční soustavy 110 kV tvoří základ distribuční soustavy a jsou zpravidla řešeny venkovním okružním rozvodem. Slouží k přenosu velkých výkonů z přenosové soustavy do míst s velkým množstvím odběrů. Nejčastěji jsou vedení konstruována jako dvojítá (dvě vedení na jednom stožáru), ale jsou i jednoduchá, trojitá nebo čtyřnásobná, a tvoří je holá ocelohliníková lana AlFe. Distribuční sítě vn jsou rozváděny venkovním a kabelovým vedením o napětíové hladině 22 kV, resp. 35 kV. Slouží k přenosu elektrické energie z míst s velkým množstvím odběrů do středů její spotřeby, jako jsou obce, města nebo velkoodběratelé. Venkovní vedení tvoří holá lana AlFe, jednoduchá izolovaná lana z hliníkové slitiny, slané závěsné kabely s plnou izolací a stíněním nebo kabelové vedení s polyetylenovou izolací. Tyto sítě jsou ve většině případů rozváděny paprskovitě. Distribuční sítě nn se navrhují s ohledem na napájené oblasti jako venkovní v malých obcích, samotách nebo v místech s nemožností kabelového vedení a ve větších městech jako kabelové. Slouží k přenosu elektrické energie z transformátorů 22/0,4 kV do přípojkové skříně spotřebitele. Tvoří je sítě o napětíové hladině 400 V, resp. 230 V a mohou být řešeny paprskovitě, okružně, zjednodušeně mřížově nebo klasicky mřížově [1], [2], [4], [12].

Problémy současné elektrizační soustavy

Celosvětově je známo, že výroba a spotřeba elektrické energie neustále narůstá. To zavádí do elektrizační soustavy značné problémy. Současná výrobní základna je založená zejména na malém množství výrobních zdrojů velkých výkonů, což znamená značné navýšení přenosů elektrické energie z výroby do míst spotřeby. Nabízející se možnost stavby nových elektrizačních sítí často znemožňují územní a ekologická omezení. Výsledkem kombinace těchto vlivů je nadměrné zatěžování elektrizační soustavy, a to jak z technologické stránky, tak i v oblasti řízení, které vede až k velkým výpadkům. Další možností, jak přispět k lepším poměrům v elektrizační soustavě, je do ní připojit OZE [12]. Tuto možnost podpořila i Evropská unie na základě tzv. SET Plan (Strategic Energy Technology Plan), jehož cílem je, aby EU do roku 2020 o 20% snížila emise skleníkových plynů, zvýšila podíl výroby energie z OZE a zvýšila energetickou účinnost [24]. Jenomže větší počet malých výrobních zdrojů znamená pro elektrizační soustavu opět navýšení přenosů elektrické energie, navíc s nestabilní a hůře předvídatelnou výrobou. Dochází tak k proměnlivému toku výkonu a často i jeho směru, což ještě více přispívá ke složitosti řízení soustavy a jejích prvků [12].

Možná řešení

Bude-li výroba elektrické energie ze zdrojů velkých a stabilních výkonů nahrazena OZE, nynější elektrizační soustava nebude tak tvrdá a bude zapotřebí podstatně změnit její stávající strukturu. Nedílnou součástí musí být i akumulace elektrické energie, změna v systému řízení a v rámci automatizace aplikace moderních prvků FACTS (Flexible AC Transmission System) [12], což je „*Střídavý přenosový systém obsahující regulátory statické a založené na výkonové elektronice za účelem zlepšit říditelnost a zvýšit přenosovou schopnost systému*“ [26].

Se zavedením OZE do elektrizační soustavy nedojde jen ke změně struktury v oblasti technické, ale i v oblasti legislativní (podpora, spolehlivost, rychlost reakce, snížení omezení spotřebitelů), či ekonomické, obchodní a politické (zvýšení efektivity procesů podnikatelských subjektů v energetice, snížení ztrát, zvýšení efektivity využívání elektrické energie, omezení nárůstu cel). Takovým optimálně možným řešením, které by mohlo všechny výše zmiňované požadavky splnit a najít tak mezi nimi vyváženost, se stal koncept Smart Grids [13].

1.2 Smart Grids

Jak už bylo výše popsáno, způsoby provozování distribuční soustavy jsou v posledních letech ovlivňovány integrací nových technologií, kterými jsou zejména OZE instalované v různých místech sítě. V souběhu s těmito změnami rostou také požadavky na efektivní dodávku kvalitní elektrické energie. Pokud tedy chceme mít elektrickou energii nadále k dispozici kdykoliv a v odpovídající kvalitě, musí stávající síť projít určitou modernizací [24].

„V distribučních systémech se rozvíjejí nové technologie Smart Grids, které umožňují nejen řídit a měřit toky energií, hlídat klíčové parametry sítí, chránit a zajistit vysokou spolehlivost a kvalitu dodávky elektrické energie, ale i zajistit efektivní oboustrannou komunikaci distributor-zákazník a tím zefektivnit celý distribuční systém. Smart Grids technologie zahrnují širokou škálu technicko-ekonomických procesů, které zvyšují distribuci elektrické energie na inteligentní službu zajišťující optimální využití elektrické energie, vysokou efektivnost distribuce energie a ohleduplné chování k životnímu prostředí“ [27].

V tomto případě inteligence spočívá v monitoringu, automatizovaném řízení a přizpůsobování se tak aktuálním podmínkám v síti, obousměrné komunikaci výrobce-spotřebitel a v účinném sjednocení výrobních zdrojů elektrické energie [24].

Smart Grids nejsou jediným možným řešením, ale zatím jsou nejakceptovanějším řešením, které je schopno pokrýt budoucí stav distribučních systémů v rámci udržitelného stavu [9].

1.2.1 Inteligentní síť

Pomocí inteligentní sítě je řízení toku energie mnohem variabilnější. Klasická síť pracuje na principu centralizovaného systému, tedy přenos energie jedním směrem od výroby ke spotřebiteli. Zatímco u Smart Grids funguje přenos oběma směry. Nezáleží na tom kam a co do distribuční sítě připojit, umožňují maximální využití elektrické energie z jakéhokoli výrobního zdroje kdekoli umístěného v síti, a to automaticky. Mohou se tak do sítě instalovat lokální výrobní zdroje (velké množství malých solárních elektráren, větrných parků a kogeneračních jednotek) co nejbližší místa spotřeby. Tím se omezí ztráty při distribuci. Díky obousměrné komunikaci se zvýší spolehlivost dodávky elektřiny v případě výpadku nebo poruchy. Když nastane takovýto nežádoucí stav v některé části sítě, dojde k jednoduchému přepojení na dodávku z jiné části, případný problém zůstane izolován a nebude se šířit dále. Nebo se mohou při výpadku distribuční sítě napájet ucelené oblasti díky řízeným ostrovním provozům, což jsou oblasti s bilančně vyrovnanou spotřebou a výrobou elektrické energie. Inteligentní sítě jsou schopny sofistikovaně reagovat na možné nesouměrné parametry, které se při provozu distribuční soustavy mohou vyskytnout. Jedná se zejména o špatné napěťové poměry, přetížení sítě, nesouměrné zatížení třífázové soustavy nebo případná ztráta výkonu [8].

Proto, aby inteligentní sítě byly tak efektivní, jak se od nich očekává, je nutné pomocí inteligentních měřících přístrojů (Smart Meters) shromažďovat aktuální údaje o výrobě a spotřebě, a rozhodnout tak o aktuální bilanci elektrické energie. Důležitým krokem je nasazení inteligentních elektroměrů, které zajišťují čtení všech energetických dat v reálném čase [24]. Spotřebitelé tak mají větší přehled o své spotřebě elektrické energie a možnost jí tak více ovlivnit. Pro distributora má tento systém obousměrné komunikace přínos v úspoře nákladů na odečet, může okamžitě odpojit neplatící spotřebitele nebo lépe kontrolovat černé odběry. Koncept Smart Grids také umožňuje díky rozsáhlejšímu monitorovacímu systému monitorovat a řídit distribuční síť na více napěťových úrovních (nn a vn) a eliminovat tak rozsah poruch v sítích nn přesměrováním toku energie v případě

výpadku ve vn. Dá se říci, že cílem struktury Smart Grids je přejít k podobnému principu jako je dnešní počítačová síť [8].

1.2.2 Akumulace elektrické energie

Jednou z technologických podmínek pro realizaci inteligentních sítí v návaznosti na masivním nasazování OZE do distribučních sítí je akumulace elektrické energie. Cílem akumulace energie je možnost vykrývání diagramů spotřeby energie tak, že v době špiček se použije naakumulovaná energie a naopak, když není spotřeba, tak se energie akumuluje [8]. Doposud nejlepším a nejpoužívanějším způsobem akumulace energie jsou vodní přečerpávací elektrárny. Při poklesu spotřeby je voda přečerpávána do horní nádrže a při zvýšení spotřeby se vypouští přes turbíny do dolní nádrže. V současné době v podmínkách Smart Grids se pro uchování energie využívají hlavně elektrochemické akumulátory (baterie). V budoucnosti se počítá s technologií akumulace primární energie využívající principy supravodivosti a taky s akumulací elektrické energie přeměnou na vodík [5].

1.2.3 Elektromobilita

Jednou z viditelných aplikací Smart Grids v návaznosti na akumulaci energie je elektromobilita. Ta zahrnuje celkovou podporu rozvoje elektromobilů včetně potřebné infrastruktury. Její opětovný vývoj mají v poslední době na svědomí ubývající zásoby ropy a snižování ekologické zátěže životního prostředí, ke které se pozitivně staví i Státní energetická koncepce České republiky. K vývoji elektromobility ve velké míře přispěl i rozvoj nových technologií v oblasti akumulace energie. To se projevilo na větší kapacitě a životnosti akumulátoru, dokonalejším řízení dobíjení a nižší pořizovací ceně [8].

Elektromobil (automobil poháněný elektrickým motorem napájeným z dobíjecích akumulátorů) má značné výhody v ekologičnosti provozu, kdy nedochází k uvolňování škodlivých látek do ovzduší. Lze podotknout, že v současné době mají stále největší podíl výroby elektrické energie na svědomí uhelné elektrárny a elektrická energie potřebná k nabíjení jejich akumulátorů ve většině případů pochází právě z nich. Elektromobil se tedy stane plně ekologickým, až když jeho akumulátor bude nabíjen z OZE. Mezi jeho další výhody se řadí jednoduchá konstrukce, větší účinnost díky asynchronnímu motoru a větší energetické účinnosti akumulátoru [8].

Jako většina nových technologií, tak i elektromobil má své nevýhody. Mezi ně patří krátká dojezdová vzdálenost, velká pořizovací cena a nedostačující infrastruktura dobíjecích stanic [8]. Lze však poznamenat, že jen Česká republika plánuje do roku 2015 vybudovat až 150 dobíjecích stanic [19].

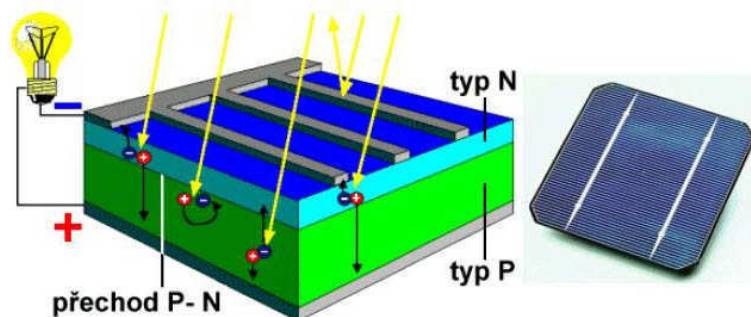
Uvažuje se, že by akumulátory v elektromobilech mohly kladně přispět k řízení elektrizační soustavy. Tím se myslí nabíjení elektromobilů při poklesu poptávky. Naopak, při zvýšené spotřebě nebo výpadku výroby by elektromobily sloužily jako záložní zdroje do doby přepojení na jiný výrobní zdroj elektrické energie. Pomohly by tak k vyváženosti mezi dodávkou a spotřebou elektrické energie v distribuční síti. Takovéto využití elektromobilů jako záložních zdrojů je zatím v rámci technickém a legislativním hradba budoucnosti [8].

1.3 Fotovoltaická elektrárna

Fotovoltaická elektrárna (FVE) je jedním z nejrozšířenějších OZE. Přímé využití energie slunečního záření patří k nejčistším a nejšetrnějším způsobům výroby elektřiny z hlediska ochrany životního prostředí [10]. Fotovoltaické systémy byly z prvopočátku používány v oblasti kosmonautiky pro napájení satelitů ve vesmíru. Poté se hojně rozšířily do miniaturní elektroniky, jako napájecí systémy pro kalkulačky, hodinky apod. V 70. letech začaly pronikat i do oblasti energetiky. V této oblasti výroby elektrické energie došlo poslední dobou díky dotačním programům k extrémnímu rozvoji. To způsobilo velký zájem různých investorů [5]. Čísla napovídají jasně. Asi přes 70% instalovaného výkonu nově spuštěných elektráren v Evropě připadá právě na OZE a v současné době tvoří podíl instalovaného výkonu elektřiny ze slunce v Evropě kolem 7%. Výjimkou není ani instalace fotovoltaických systémů na obytné domy, kdy během posledních let s klesající cenou panelů stoupá počet jejich instalací, jak pro vlastní spotřebu domu, tak i pro dodávku do sítě [11]. Dá se předpokládat, že pro udržení stávajícího rozvoje lidské civilizace budou OZE (a tedy i fotovoltaické systémy) v budoucnosti zcela zásadní [5].

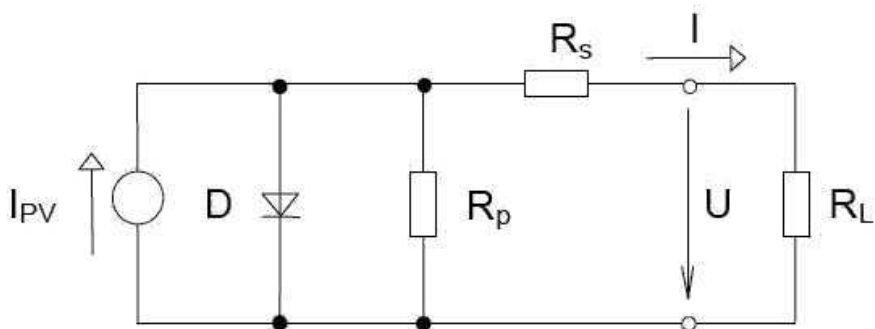
1.3.1 Princip funkce fotovoltaického článku

Základním prvkem, z kterého vychází celá podstata funkce fotovoltaických systémů, a který přeměňuje přímé i nepřímé sluneční záření na stejnosměrný elektrický proud, je fotovoltaický článek. Jeho základním principem je fotoelektrický jev. Při dopadu fotonů ze slunečního záření na polovodič fotovoltaického článku dochází k uvolňování elektronů a vznikají tak páry elektron – díra. U kovových materiálů by docházelo k jejich rychlému opětovnému spojování. A právě proto se využívá polovodičů (křemík), které pomocí vnitřního elektrického pole PN přechodu vzniklé páry oddělují. Vytvořený náboj se tak odvádí z článku (Obr. 1.3). Elektrony uvolněné absorpcí fotonů ze slunečního záření musí tedy nejprve projít přes zátěž a až poté se mohou opět spojit s dírami. A právě díky tomuto principu slouží fotovoltaický článek jako zdroj elektrického proudu [10].



Obr. 1.3 Schéma fotovoltaického článku a princip činnosti

Princip funkce fotovoltaického článku lze také popsat pomocí náhradního obvodu, znázorněného na obrázku 1.4. Ozářená oblast přechodu PN o určité ploše A generuje proud o hustotě J , přičemž dochází k nabíjení vrstvy typu P kladným pólem (díry) a vrstvy typu N záporným pólem (elektrony). Tím je přechod v propustném směru a část generovaného proudu teče diodou D zpět [5].



Obr. 1.4 Náhradní schéma fotovoltaického článku [5]

Svodový odpor R_p znázorňuje technologické nedostatky přechodu PN a sériový odpor R_s vliv odporu materiálu a proudových sběrnic. Pro výstupní napětí U na fotovoltaickém článku platí:

$$U = U_j - \Delta U_{R_s} \quad (1.1)$$

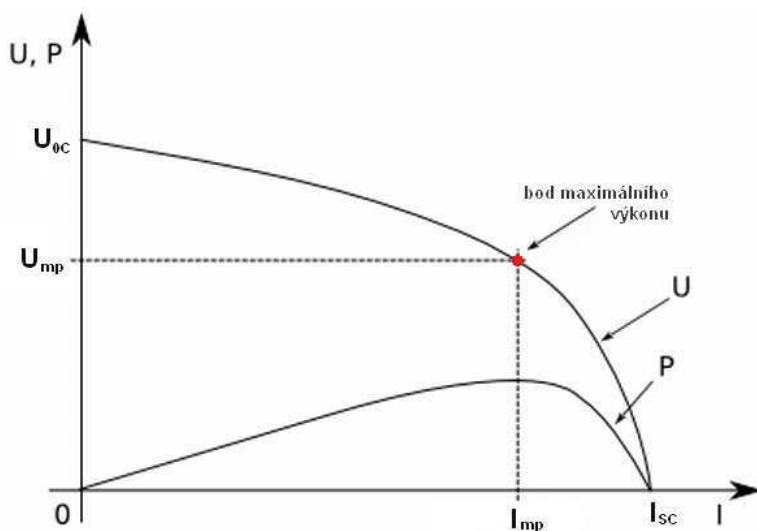
kde U_j představuje napětí na diodě a ΔU_{R_s} úbytek napětí na sériovém odporu. Velikost tohoto napětí se pohybuje od 0,5 V do 1,1 V v závislosti na druhu polovodiče, technologickém postupu apod. Výstupní proud fotovoltaického článku je dán generovaným proudem I_{PV} , proudem protékaným diodou I_D a svodovým proudem I_p , pro který platí:

$$I = I_{PV} - I_D - I_p \quad (1.2)$$

Z výše uvedeného je patrné, jak sériový odpor R_s ovlivňuje výstupní proud, a tím i celkovou účinnost fotovoltaického článku [5].

Voltampérová charakteristika

Základní informace o činnosti každého fotovoltaického článku znázorňuje jeho voltampérová charakteristika (Obr. 1.5).



Obr. 1.5 Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku [5]

Následující veličiny charakterizující fotovoltaické články jsou vždy udávány za standardních testovacích podmínek, tj. při standardní testovací teplotě (STC) 25°C, intenzitě slunečního záření (I) 1000 W·m⁻² a definované vzduchové hmotě (AM) 1,5.

Napětí naprázdno (U_{oc}) - maximální napětí článku, kterého dosáhne v případě, kdy k němu není připojen žádný spotřebič.

Proud nakrátko (I_{sc}) - maximální (zkratový) proud článku, který může při dané intenzitě slunečního záření dodávat.

Výkon (P) – součin napětí a proudu. Každý článek má tzv. pracovní bod charakteristiky označován jako bod maximálního výkonu (MPP). V tomto bodě má článek největší výkon o napětí U_{mp} a proudu I_{mp} . Výkon určitého článku závisí na ozáření, na spektru světla a na teplotě článku. Pro výkon fotovoltaického článku tedy platí:

$$P = U_{mp} \cdot I_{mp} \quad (1.3)$$

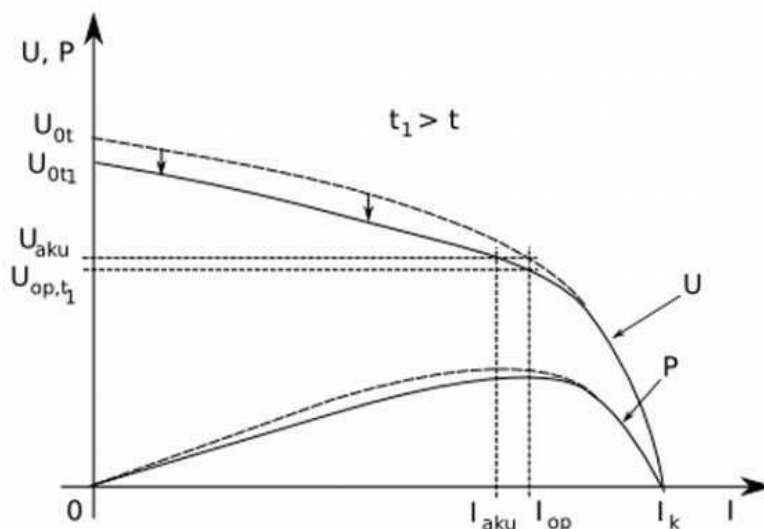
Činitel plnění (FF – Fill Factor) – podíl maximálního výkonu v bodu MPP a maximálního výkonu definovaného pomocí maximálního napětí a maximálního proudu. Pro činitel plnění fotovoltaického článku můžeme tedy napsat rovnici

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1.4)$$

Účinnost (η) – podíl maximálního výkonu článku v bodu MPP a výkonu dopadajícího slunečního záření (P_{in}). Pro účinnost fotovoltaického článku můžeme napsat rovnici

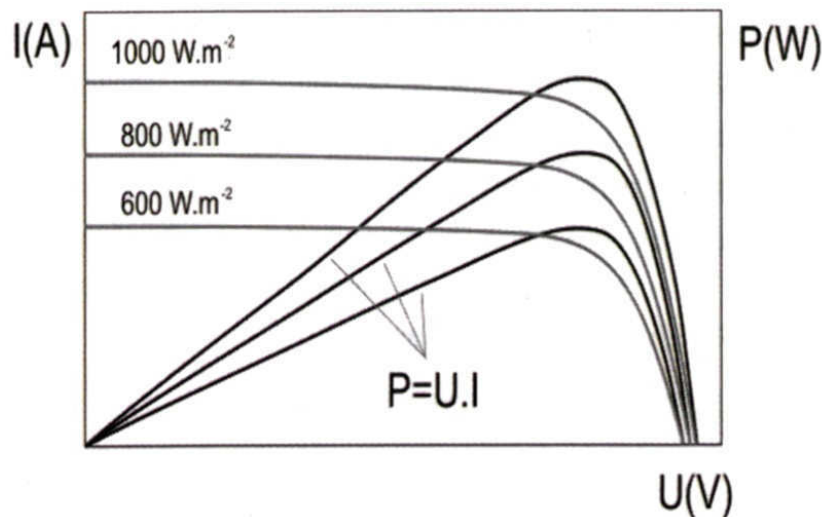
$$\eta = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} \quad (1.5)$$

Mezi veličiny, které mají značný vliv na průběh VA charakteristiky, patří především teplota a hodnota intenzity slunečního záření. Při nadměrném zahřívání fotovoltaického článku, často v kombinaci s nedostačujícím chlazením, nastává změna elektrických vlastností článku a to pokles napětí naprázdno. Tento pokles značně ovlivní jeho výkon (Obr. 1.6).



Obr. 1.6 Vliv teploty na výkon fotovoltaického článku [5]

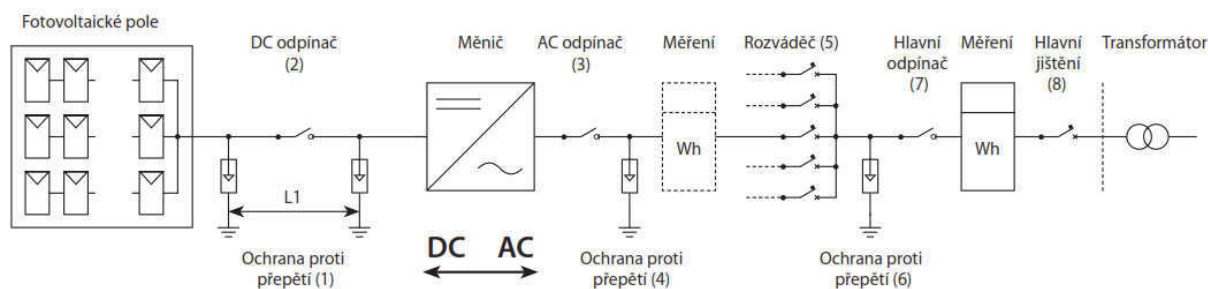
Na hodnotě intenzity slunečního záření závisí účinnost fotovoltaického článku. Pokud má článek malý sériový odpor R_s , tak s rostoucí intenzitou záření roste i účinnost. A naopak pokud má článek velký sériový odpor, tak s rostoucí intenzitou záření účinnost klesá. Na obrázku 1.7 jsou průběhy závislosti účinnosti fotovoltaického článku na některých intenzitách slunečního záření [5].



Obr. 1.7 Vliv intenzity slunečního záření na výkon fotovoltaického článku [5]

1.3.2 Komponenty fotovoltaických systémů

Samotný fotovoltaický systém se skládá z fotovoltaických panelů, konstrukčních prvků, ochranných zařízení, invertorů a elektroměrů. Pro připojení k distribuční síti se doplňuje o rozvaděče, transformátor, další ochranné zařízení a elektroměr. V některých případech může obsahovat i akumulaci jednotky a natáčecí zařízení pro moduly.



Obr 1.8 Blokové schéma fotovoltaické elektrárny připojeného k síti [23]

Fotovoltaické panely

Tak, aby bylo možné prakticky využít napětí z fotovoltaických článků, musí se vhodně zapojit. Při zapojení několika článků do série dochází ke sčítání napětí a výstupní proud odpovídá proudu jednoho článku. Pokud se články zapojí paralelně, dochází ke sčítání proudů a výstupní napětí odpovídá napětí jednoho článku. Pro dosažení větších výkonů je třeba fotovoltaické články zapojit sérioparalelně. Zapojení několika článků, jak sériové, paralelní nebo sérioparalelní, vytváří

fotovoltaické panely (moduly). Spojením více panelů vzniká fotovoltaické pole, které tvoří fotovoltaické elektrárny (FVE) [22].

Pro bezpečné uložení se fotovoltaické články vkládají do etylvinylacetátové fólie (EVA). Jejich přední stranu tvoří vysoce průhledné a speciálně tvrzené sklo. Tím propouští na článek co největší množství slunečního záření a současně ho chrání před atmosférickými vlivy. Zadní strana je opatřena další skleněnou vrstvou nebo vícevrstvou plastovou fólií s vysokou pevností. Panely jsou uzavřeny v hliníkovém rámu pro vhodné uchycení k nosným konstrukcím. Na zadní stěně jsou osazeny svorkovnicí s kabelovými vývody a překlenovacími diodami. Fotovoltaický panel tvoří kompaktní celek s předepsanými elektrickými, optickými a mechanickými vlastnostmi [5].

Konstrukční prvky

Pro správnou instalaci fotovoltaických panelů je jejich nedílnou součástí nosná konstrukce. V současné době se používají konstrukce pro sedlové střechy (hliníkové profily), ploché střechy (ocelovými pozinkovanými a hliníkovými profily), volná prostranství (ocelovými pozinkovanými a hliníkovými profily ukotvené do země nebo betonu) a polohovatelné systémy (trackery) [5].

Invertory

Jak už bylo výše zmíněno, fotovoltaické panely vyrábí proud stejnosměrný, který je nutno změnit na proud střídavý, aby je bylo možno připojit do elektrické rozvodné sítě. Zařízení umožňující tuto přeměnu se nazývá invertor (měnič nebo také střídač). Invertory jsou také schopny informovat o vlastní výrobě elektrické energie [5].

„Invertor musí dodávat co nejvyšší výkon s minimem ztrát. To může být zajištěno odstraněním transformátoru s následným snížením tepelných ztrát a užitím zařízení pro sledování bodu maximálního výkonu (MPP), které změnou vstupního odporu zajišťuje optimální chod invertoru“ [28].

Připojení energie z panelů do sítě (přifázování střídače) je prováděno automatizovaně. Invertory se vyrábějí pro konkrétní použití. Invertory pro ostrovní použití generují svůj vlastní kmitočet, který odpovídá síťovému kmitočtu ($f = 50 \text{ Hz}$). Tím je možno používat běžné elektrické spotřebiče střídavého proudu. Invertory pro síťové použití synchronizují svůj kmitočet a napětí s aktuálními parametry rozvodné sítě [20].

Invertory se dělí z hlediska zapojení ve FVE na:

- panelové (invertor je připojen pouze k jednomu fotovoltaickému panelu),
- řetězcové nebo stringové (každý invertor je připojen k několika fotovoltaickým panelům vzájemně propojeným do série, případně i paralelně)
- centrální (připojené na stovky až tisíce fotovoltaických panelů) [5].

Elektroměry

Elektroměry pro fotovoltaické systémy připojené do distribuční sítě se používají vždy dva a volí se podle vybraného způsobu výkupu elektrické energie.

Výkupní cena – první dvoukvadrantový elektroměr zaznamenává spotřebu a druhý dvoukvadrantový měří produkci FVE.

Zelený bonus – první dvoukvadrantový elektroměr měří produkci FVE a druhý čtyřkvadrantový zaznamenává přebytky prodané do DS a počet nakoupených kWh [20].

Transformátory

Transformátory u fotovoltaických systémů se používají tehdy, kdy je nutné připojit FVE do sítě vn. Provádí se to tak hlavně u větších elektráren [20].

Ochranná zařízení

U fotovoltaických panelů s větším počtem paralelně řazených stringů je nutno zajistit ochranu proti zpětným proudům a nadproudovou ochranu kabelů fotovoltaického pole při poruše. Současně se řeší i ochrana proti přepětí (1, obr. 1.8). Pokud je vedení mezi fotovoltaickým polem a měničem delší, je vhodné použít svodiče přepětí jak u měniče, tak v blízkosti fotovoltaických polí. K zajištění údržby střídače (měniče) je nutné splnit požadavek na jeho možné odpojení od AC i DC strany, proto je u měniče instalován DC odpínač (2, obr. 1.8) a AC odpínač (3, obr. 1.8). V případě, že je funkčně zajištěno, aby vypnutí (zapnutí) DC strany probíhalo vždy bez zátěže, tzn., že AC strana bude vypínána dříve a zapínána následně, pak lze na místě DC strany použít i odpojovač. Za AC odpínačem je instalován svodič přepětí (4, obr. 1.8), který je doporučen především následuje-li dlouhé vedení. Místní měření elektrické energie vyrobené fotovoltaickým zdrojem je připojeno přes jistící přístroj k rozvaděči (5, obr. 1.8). V případě fotovoltaického zdroje velkého výkonu jsou do rozvaděče připojeny přes jistící přístroje jeho jednotlivé paralelní větve. Rozvaděč a následný elektrický rozvod je chráněn ze strany připojení k distribuční síti svodičem přepětí (6, obr. 1.8). Měření dodané a spotřebované energie (výroba a spotřeba v místě – zelený bonus) nebo jen dodané energie (pouze výroba bez spotřeby) předchází hlavní odpínač (7, obr. 1.8) rozvaděče. Rozvaděč, odpínač a vedení směrem k distribučnímu rozvodu je chráněno proti přetížení a zkratu hlavním jistícím přístrojem (8, obr. 1.8) [23].

1.3.3 Zapojení fotovoltaických systémů

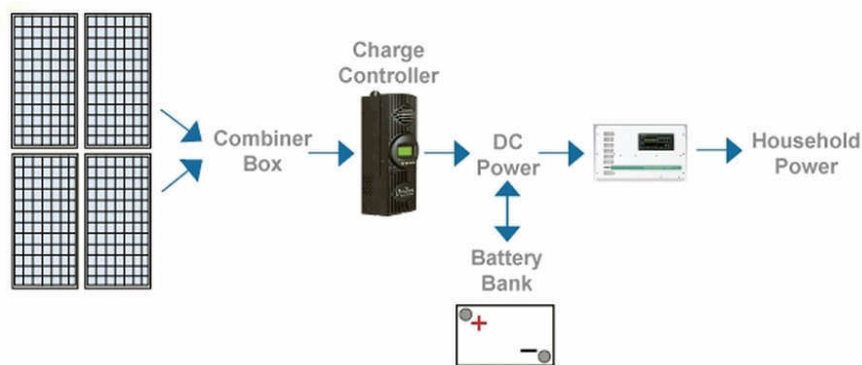
Z hlediska aplikace lze tyto systémy rozdělit na tři základní typy:

- autonomní systémy,
- systémy připojené k elektrické síti,
- hybridní systémy [5].

Autonomní systémy

Autonomní systémy (systémy Grid-off) se používají převážně v místech, kde není dostupná veřejná elektrorozvodná síť. Tyto systémy se skládají z fotovoltaických modulů, akumulátorové baterie a ochranného obvodu, který chrání akumulátorovou baterii před nadměrným vybitím nebo přebitím. Větší systémy mohou obsahovat i měnič napětí. Blokové schéma ostrovního fotovoltaického systému je na obr. 1.9 [10].

Ostrovní systémy využívají speciální akumulátorové baterie, konstruované pro pomalé nabíjení i vybíjení. Optimální nabíjení a vybíjení akumulátorů je zajištěno regulátorem dobíjení. K ostrovnímu systému lze připojit spotřebiče napájené stejnosměrným proudem (napětí systému bývá zpravidla 12 V nebo 24 V), případně běžné síťové spotřebiče 230 V/~50 Hz napájené přes napěťový střídač (měnič). Tyto systémy mají uplatnění například jako zdroj elektrické energie pro chaty a další objekty, napájení dopravní signalizace, telekomunikačních zařízení nebo monitorovacích přístrojů v terénu, u zahradního osvětlení a světelné reklamy [5].



Obr. 1.9 Blokové schéma systému Grid-off [5]

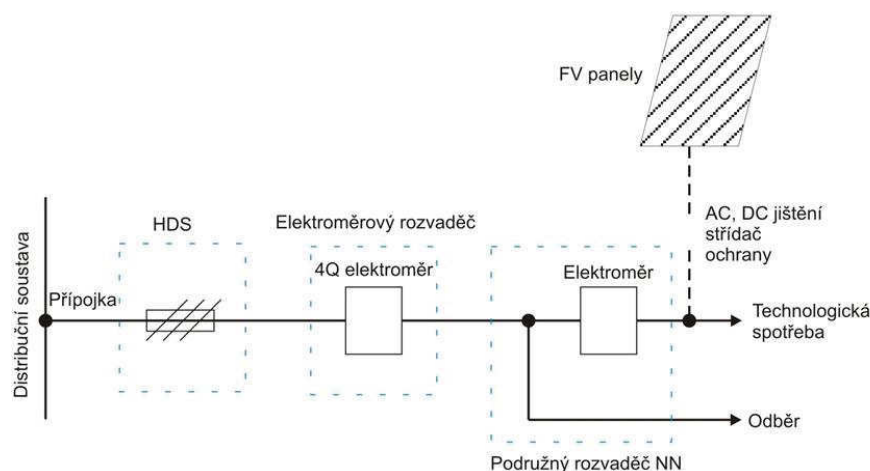
Systémy připojené k elektrické síti (Grid-on)

Výhodou systémů Grid-on je skutečnost, že veškerá vyrobená elektrická energie se na rozdíl od systémů Grid-off zpracuje. Tyto systémy se obvykle skládají z většího množství fotovoltaických modulů, měničů napětí (invertorů), zařízení pro měření a regulaci a sítových ochranných. Připojení fotovoltaických systémů do elektrizační soustavy může být provedeno ve dvou základních variantách, jak je zobrazeno na obr. 1.10 a 1.11 [5].

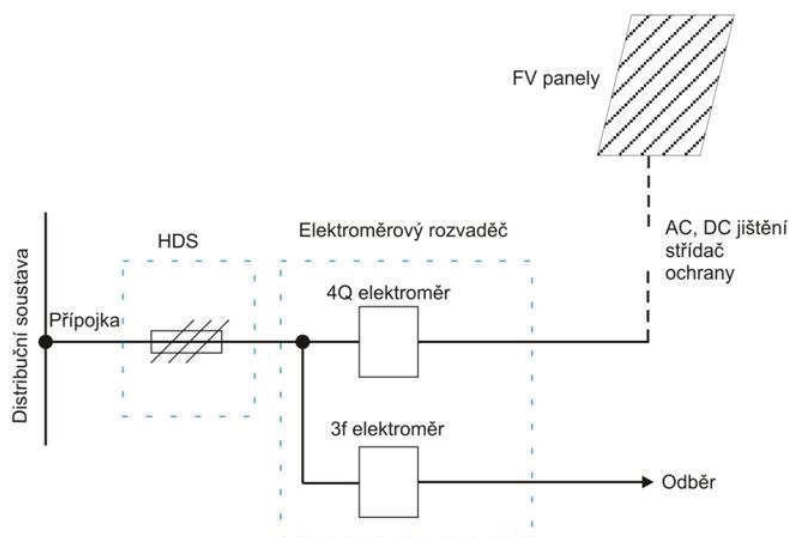
Obr. 1.10 představuje systém zapojení v tzv. Zeleném bonusu. Za hlavní domovní skříň (HDS) je osazen čtyřkvadrantový elektroměr (4Q) a za ním je napojený domovní rozvod a elektrárna pomocí dalšího elektroměru. Toto zapojení se využívá v případech, kdy je převážná část vyrobené elektrické energie využita pro vlastní spotřebu objektu s instalovaným FV systémem [5].

Obr. 1.11 představuje systém zapojení v tzv. Výkupním tarifu. FV elektrárna je v tomto případě připojena mezi stávající elektroměr a hlavní domovní skříň (HDS) pomocí čtyřkvadrantového elektroměru. Tento systém zapojení se využívá v případech, kdy je veškerá vyrobená elektrická energie dodána výrobcem do elektrizační soustavy [5].

Na obytné domy se obvykle instalují systémy s výkonem v rozmezí 1 – 10 kWp. Pro investory jsou však mnohem zajímavější systémy instalované na střechy větších bytových nebo nebytových komplexů, popřípadě instalace na volném prostranství (20kWp až jednotky MWp) [5].



Obr. 1.10 Zapojení systému pro vlastní spotřebu [5]



Obr. 1.11 Zapojení systému pro dodávku do sítě [5]

Měření dodané a spotřebované elektrické energie je rozdílné pro fotovoltaické systémy do 20 kWp a nad 20 kWp. U systémů do 20 kWp se pro určení dodávky a spotřeby využívá přímý 4Q elektroměr. Pro systémy nad 20 kWp je měření spotřeby a dodávky zajištěno následovně: [5]

- nepřímé měření dodávky 4Q elektroměrem na NN straně transformátoru (do 600 kVA),
- nepřímé měření dodávky 4Q elektroměrem na VN straně transformátoru,
- samostatné měření spotřeby.

Hybridní systémy

Hybridní fotovoltaický systém je v podstatě kombinací klasické síťové elektrárny (Grid-on) a ostrovního systému (Grid-off). Oproti systémům Grid-on mají hybridní fotovoltaické systémy výhodu v maximálním využití vyrobené energie v místě výroby, ať už ve formě elektrické energie či pro přitápění, ohřev TUV, klimatizace, zavlažování, provoz bazény nebo jiných předem určených spotřebičů, aniž by bylo zbytečně dodáno příliš mnoho energie do distribuční sítě [5].

Další nespornou výhodou hybridního fotovoltaického systému je již integrovaná funkce pro využití přebytečné energie ve výkonových špičkách, kdy inteligentní hybridní měnič již dnes dokáže přeměňovat přebytečnou energii v reálném čase či s řízeným zpožděním do předem určených, energeticky náročných spotřebičů. Příklad hybridního fotovoltaického systému je na obr. 1.12 [5].



Obr. 1.12 Hybridní fotovoltaický systém [5]

1.4 Zpětné vlivy na napájecí síť

Zvýšený podíl provozu OZE s kolísající dodávkou elektrické energie v distribučních soustavách (DS), vede k nárůstu problémů v podobě negativních zpětných vlivů. Ty se mohou projevovat produkcí vyšších harmonických proudů, napětovou nesymetrií, kolísáním napětí, flikrem nebo rušením signálu HDO. Mohou tak rušivě ovlivňovat funkci jiných přístrojů a zařízení zapojených v DS. Vzhledem k současnému zvyšování spotřeby elektrické energie, ochraně životního prostředí, volnému trhu s elektřinou a integrací citlivých zařízení do elektrických sítí je v čím dál větší míře kladen důraz na kvalitu elektrické energie [5]. Proto se stanovují určité limity rušivých vlivů OZE provozovaných paralelně k DS, ve kterých OZE nesmí způsobit zhoršení kvality elektrické energie nad dovolené meze [8].

V této kapitole je uveden výtah důležitých pravidel provozování distribučních soustav (PPDS) vydaných provozovateli distribučních soustav a schválených energetickým regulačním úřadem (ERÚ). Jedná se o přílohu č. 4 [7], která pojednává o pravidlech pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele DS. Zkoumanými veličinami ovlivňující DS jsou harmonické a meziharmonické proudy, velikost a změny napětí, dlouhodobý flikr a míra ovlivnění HDO.

Aby nebyla rušena zařízení dalších odběratelů a provozovaná zařízení PDS, je zapotřebí omezit zpětné vlivy místních výroben. Pro posouzení je třeba vycházet ze zásad pro posuzování zpětných vlivů a jejich přípustných mezí [10], [11], [12].

Bez další kontroly zpětných vlivů mohou být výroby připojeny, pokud poměr zkratového výkonu sítě S_{KV} ke jmenovitému výkonu celého zařízení S_{TA} je větší než 500.

Pokud výrobce nechá své zařízení ověřit v uznávaném institutu, pak lze do posuzování připojovacích podmínek zahrnout příznivější činitel S_{KV}/S_{TG} (<500).

Pro individuální posouzení připojení jedné nebo více vlastních výroben v jednom společném napájecím bodu je třeba vycházet z následujících mezních podmínek:

1.4.1 Změna napětí

Změna napětí $\Delta U \leq 3 \% U_n$ (pro společný napájecí bod v síti nn)
 $\Delta U \leq 2 \% U_n$ (pro společný napájecí bod v síti vn a 110 kV).

Tyto hodnoty platí za předpokladu dodržení mezí napětí podle [14].

Dlouhodobý flickr

Pro posouzení jedné nebo více výroben v jednom předávacím místě je zapotřebí se zřetelem na kolísání napětí vyvolávající flickr dodržet ve společném napájecím bodě nn a vn mezní hodnotu

$$P_{lt} \leq 0,46$$

ve společném napájecím bodě 110 kV mezní hodnotu

$$P_{lt} \leq 0,37$$

U výroby s více jednotlivými zařízeními je zapotřebí vypočítat P_{lt} pro každé zvlášť a výslednou hodnotu pro flickr ve společném napájecím bodě určit podle následujícího vztahu

$$P_{ltres} = \sqrt{\sum_i P_{lti}^2} \quad (1.6)$$

1.4.2 Proudý harmonických a mezipharmonických

Harmonické a mezipharmonické vznikají především u zařízení se střídači nebo měniči frekvence. Harmonické a mezipharmonické proudy emitované těmito zařízeními musí udat výrobce, např. zprávou o typové zkoušce.

Výroby v síti nn

Pokud výroby splňují požadavky na velikosti emise harmonických proudů I_v podle [23], resp. [24], lze považovat vliv emitovaných harmonických proudů na síť DS za přípustný. Pokud nejsou meze v těchto normách dodrženy, je možné pro posouzení připojitelnosti bez přídavných opatření použít následující jednoduchá kritéria:

$$I_{vnn} = i_v \cdot \frac{S_{kv}}{\sin \psi_{kv}} \quad (1.7)$$

kde vztažný proud i_v je uveden v tabulce 1.1 a $\sin \psi_{kv}$ je sinus úhlu impedance soustavy v místě připojení.

Tento výpočetní postup nemůže být použit, pokud je společný napájecí bod v síti vn.

Tab. 1.1 Vztažné proudy harm. pro výpočet max. emise výroben připojených do sítí nn [7]

Řád harmonických v (-)	Přípustný vztažný proud i_v [A/MV·A]
3	3
5	1,5
7	1
9	0,7
11	0,5
13	0,4
17	0,3
19	0,25
23	0,2
25	0,15
$25 < v < 40$	$0,15 \times 25/v$
sudé	$1,5/v$
$v < 178^b$	$4,5/v$

a...liché
b...celočíselné a neceločíselné v pásmu šířky 200 Hz od střední frekvence ν
Měřeno podle ČSN EN 61000-4-7

Výrobní v síti vn

Pro pouze jediné předávací místo v síti vn lze určit celkové v tomto bodě přípustné harmonické proudy ze vztažných proudů i_{vvn} z tabulky 1.2, násobených zkratovým výkonem ve společném napájecím bodu

$$I_{vvn} = i_{vvn} \cdot S_{kV} \quad (1.8)$$

Pokud je ve společném napájecím bodu připojeno několik zařízení, pak se určí harmonické proudy přípustné pro jednotlivá zařízení násobením poměru zdánlivého výkonu zařízení S_A k celkovému připojitelnému nebo plánovanému výkonu S_{AV} ve společném napájecím bodu

$$I_{vvn} = i_{vvn} \cdot S_{kV} \cdot \frac{S_A}{S_{AV}} \quad (1.9)$$

U zařízení sestávajících z jednotek stejného typu lze za S_A dosadit $\sum S_{nE}$. U zařízení z nesterýných typů jde pouze o odhad.

Celkově přípustné harmonické proudy pro síť vn, vztažené na zkratový výkon, které jsou vyvolány zařízením přímo připojeným do této sítě, jsou uvedeny v tabulce 1.2. Pro harmonické s řády násobků tří platí hodnoty pro nejbližší řád, a to pouze, pokud se nulová složka proudů z výroby neuzavírá do sítě.

Pokud podle tohoto výpočtu dojde k překročení přípustných harmonických proudů, pak v zásadě připojení není možné, pokud podrobnější výpočet neprokáže, že přípustné hladiny harmonických napětí v síti nejsou překročeny.

Tab. 1.2 Vztažné proudy harm. pro výpočet max. emise výroben připojených do sítí vn [7]

Řád harmonické v (-)	Přípustný vztažný proud harmonických i_{vvn} , [A/MV·A]		
	Síť 10 kV	Síť 22 kV	Síť 35 kV
5	0,115	0,058	0,033
7	0,082	0,041	0,023
11	0,052	0,026	0,015
13	0,038	0,019	0,011
17	0,022	0,011	0,006
19	0,016	0,009	0,005
23	0,012	0,006	0,003
25	0,01	0,005	0,003
> 25 nebo sudé	0,06/v	0,03/v	0,017/v

Výrobní v síti 110 kV

Pro tyto sítě udává následující tabulka celkově dovolené proudy harmonických pro zařízení připojená do jedné transformovny nebo do jednoho vedení 110 kV. Tyto hodnoty převzaté z [18] se vztahují ke zkratovému výkonu v předávacím místě výroby.

Tab. 1.3 Vztažné proudy harm. pro výpočet max. emise výroben připojených do sítí 110 kV [7]

Řád harmonických v (-)	Přípustný vztažný proud i_{v110kV} [A/GV·A]
5	2,6
7	3,75
11	2,4
13	1,6
17	0,92
19	0,7
23	0,46
25	0,32
> 25 nebo sudé	5,25/v

6...celočíslné a neceločíslné v pásmu šířky 200 Hz

Přípustné proudy harmonických jednoho výrobního zařízení se získají pak pro harmonické do řádu 13 takto:

$$I_{v110kV} = i_{v110kV} \cdot S_{kv} \cdot \frac{S_A}{S_0} \quad (1.10)$$

pro harmonické řádů vyšších než 13 a pro meziharmonické:

$$I_{v110kV} = i_{v110kV} \cdot S_{kv} \cdot \sqrt{\frac{S_A}{S_0}} \quad (1.11)$$

Proudy harmonických a mezipharmonických řádů vyšších než 13 se nemusí respektovat, když je výkon největšího dodávajícího měniče menší než 1/100 zkratového výkonu sítě v přípojném bodě. Je-li výrobní zařízení připojeno k úseku vedení mezi dvěma transformovny, dosahuje se za referenční výkon S_0 tepelný mezní výkon tohoto úseku vedení. Při připojení výrobního zařízení přímo nebo přes zákaznickovo vedení k transformovně se za S_0 dosahuje maximálně k transformovně připojitelný vyráběný výkon.

Dodržení přípustných proudů zpětných vlivů lze prokázat měřením celkového proudu v předávacím místě nebo výpočtem z proudů připojených jednotlivých zařízení. Měření proudů harmonických a mezipharmonických se musí provádět podle ČSN EN 61000-4-7 ed.2. Proudy harmonických, přiváděné zkresleným napětím sítě do výrobního zařízení (např. do obvodů filtru), se výrobnímu zařízení nepřipočítávají.

1.4.3 Ovlivnění zařízení HDO

Zařízení hromadného dálkového ovládání (HDO) jsou obvykle provozována s frekvencemi v rozmezí 183,3 až 283,3 Hz. Místně použitou frekvenci HDO je zapotřebí zjistit u PDS. Vysílací úroveň je obvykle 1,6 % až 2,5 % U_n .

Ovlivnění zařízení HDO způsobují převážně výroby a zařízení pro kompenzaci účinníku (KZ). Výroby případně KZ připojené do přípojnice, do níž se vysílá signál HDO, ovlivňují přidavným zatížením vysílače HDO, které plyne z:

- vlastního zařízení výroby
- zvýšeného zatížení sítě, které je v důsledku výroby k síti připojeno.

V těchto případech se posuzuje vliv výroby na zatížení příslušného vysílače HDO. Vychází se z informace o jeho zatížení, kterou poskytne PDS. Pokud je toto blízké maximu, je připojení bez opatření nepřípustné. Pokud tomu tak není, je přípustné následující zvýšení zatížení vysílače:

- do 5 A u vysílače do 110 kV
- do 2 A u vysílače do vn.

Výroby (případně KZ) připojované k síti mimo přípojnic, do níž se vysílá signál HDO, smí způsobit snížení úrovně signálu HDO maximálně o 5% za předpokladu, že i po tomto snížení bude dodržena minimální přípustná úroveň signálu HDO určená týdenním měřením. Tato úroveň musí být zaručena i při mimořádných zapojeních sítí.

Pro frekvence 183 – 283,3 Hz platí následující minimální úrovně signálu HDO: nn 150% U_f , vn 190% U_f , 110 kV 200% U_f , kde U_f je náběhové napětí přijímače, které obvykle bývá v rozmezí 0,8 – 0,9 % U_n [14].

Kromě omezení poklesu hladiny signálu HDO nesmí být též produkována nežádoucí rušivá napětí. Obecně platí:

- výrobnou vyvolané rušivé napětí, jehož frekvence odpovídá místně použité frekvenci HDO nebo leží v její bezprostřední blízkosti, nesmí překročit 0,1 % U_n
- v předchozím uvedená napětí, jejichž frekvence je o 100 Hz pod nebo nad místně použitou frekvenci HDO, nesmějí v přípojném bodu překročit 0,3 % U_n .

Výše uvedené hodnoty 0,1% U_n resp. 0,3% U_n vycházejí z předpokladu, že v síti nn nejsou připojeny více než dvě vlastní výroby. Jinak jsou zapotřebí zvláštní výpočty [14].

Bez posouzení je možné připojit k síti výroby, nepřesáhne-li jejich výkon v přípojném bodu a výkon v celé síťové oblasti (včetně výroben již připojených) hodnoty uvedené v tabulce 1.4.

Tab. 1.4 Podmínky pro připojení výrobní bez posouzení vlivu na signál HDO [7]

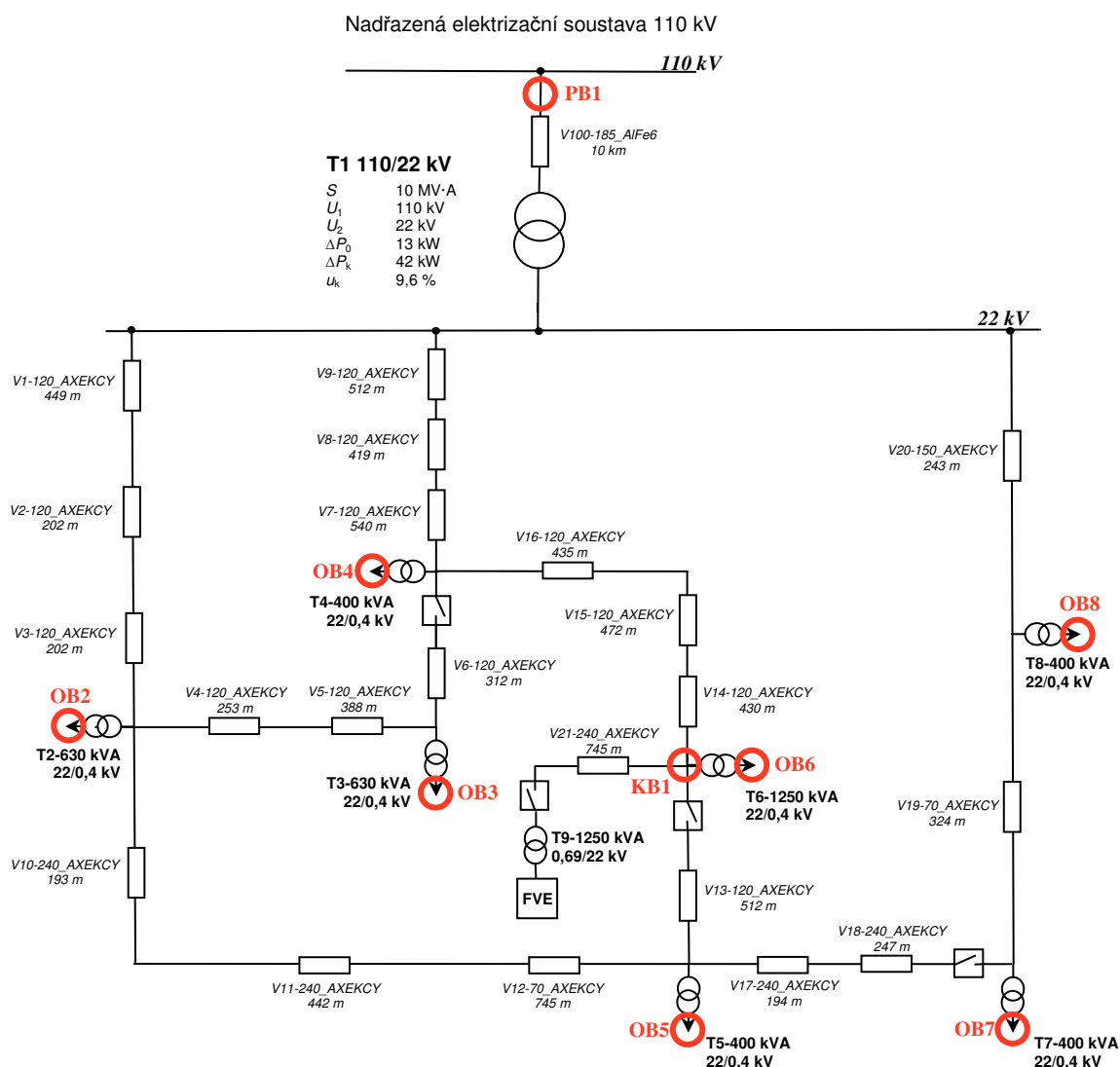
<i>Napěťová úroveň</i>	<i>Celkový výkon výrobních zařízení</i>	
	<i>V přípojném bodu</i>	<i>V síťové oblasti</i>
0,4 kV	5 kVA FVE 20 kVA	10 kVA FVE 40 kVA
VN	500 kVA	1 MVA
110 kV	5 MVA	10 MVA

2. MATEMATICKÝ MODEL VYMEZENÉ SOUSTAVY

V této části práce je úkolem navrhnout a vytvořit matematický model vymezené energetické soustavy v prostředí ATPDraw pro požadavky Smart Grids (Obr. 2.1). Význam Smart Grids byl popsán výše. Je ale nutno připomenout, že jeden z hlavních úkolů těchto inteligentních sítí spočívá v plánování dodávky a spotřeby elektrické energie z OZE v závislosti na jejich nerovnoměrném toku výkonu. V tomto modelu je tedy nasimulován provoz jednoho z OZE, a to FVE v distribuční síti.

Matematický model vymezené energetické soustavy je sestaven pomocí preprocesoru ATPDraw, což je grafické uživatelské rozhraní programu ATP-EMTP (Alternative Transients Program - Electromagnetic Transients Program). ATP-EMTP je nejrozšířenější program pro digitální simulaci přechodných elektromagnetických a elektromechanických dějů v energetických systémech.

Model obsahuje fiktivní část distribuční soustavy, která se svým provedením přibližuje skutečnému stavu. Tvoří ji část vvn (110 kV) s transformační vazbou na vn (22 kV) a síť vn (22 kV) s transformační vazbou na nn (0,4 kV).

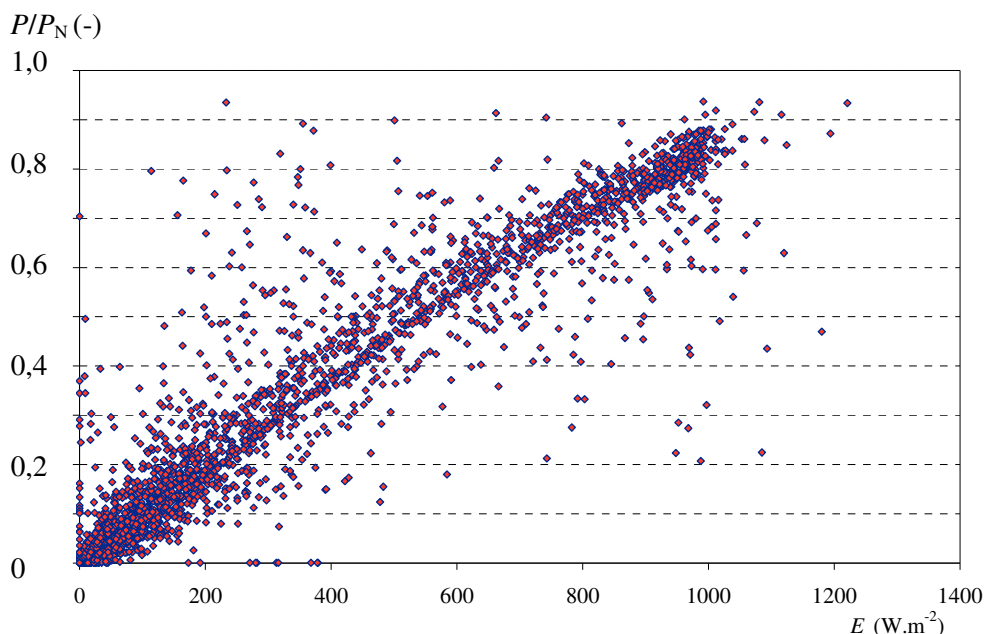


Obr. 2.1 Blokové schéma vymezené elektrizační soustavy

2.1 Fotovoltaická elektrárna

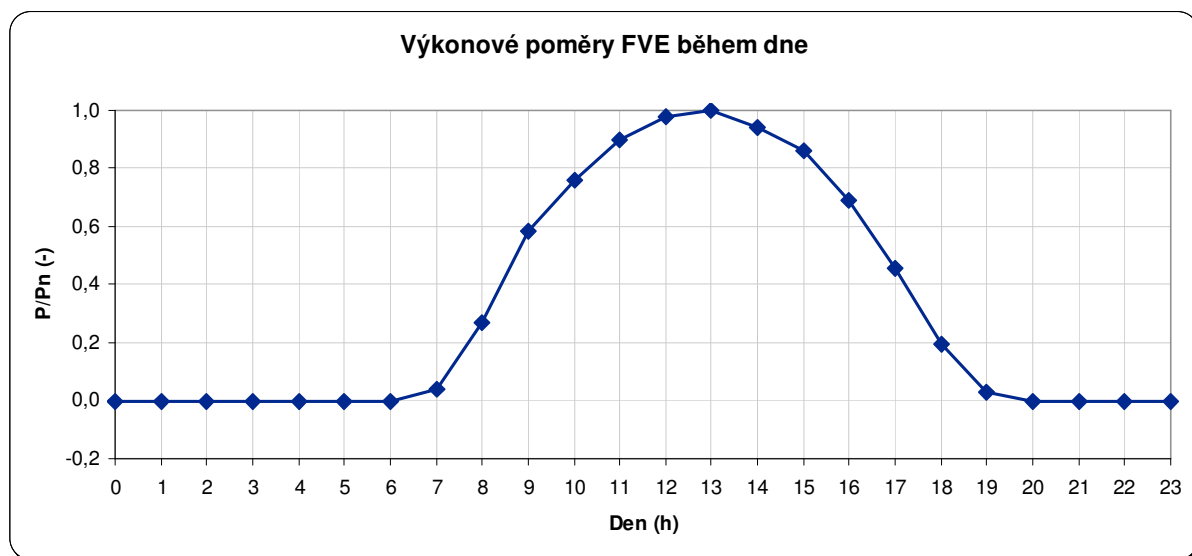
V této práci byla pro vymezenou energetickou soustavu vybrána a následně implementována fotovoltaická elektrárna (FVE) s instalovaným výkonem 1,1MWp. Tato FVE je osazená monokrystalickými fotovoltaickými panely a do elektrizační soustavy je připojena přes blokový transformátor 0,69/22 kV (T1).

Činnost každé FVE charakterizuje její výkonová křivka. Ta definuje vztah mezi vstupní veličinou (intenzitou slunečního záření) a výstupní veličinou (elektrickým výkonem). Výkon se většinou udává v poměrných jednotkách od 0 do 1, což je podíl skutečného výkonu FVE k jejímu instalovanému výkonu. Dá se předpokládat, že při změně intenzity slunečního záření se mění elektrický výkon fotovoltaického panelu téměř lineárně. Na obrázku 2.2 je zobrazena výkonová křivka FVE v letním měsíci. Stejným způsobem lze zobrazit i provozní stavy v ostatních měsících. V letním období za jasného dne dopadá na zemský povrch v poledních hodinách přibližně 800 až 1 000 W·m⁻². Při zatažené obloze klesá toto množství na 50 až 100 W·m⁻². Jelikož slunce svítí každý den, můžeme předpokládat téměř stejný lineární charakter výkonové křivky v průběhu roku. Rozdíl mezi jasným a oblačným dnem a tedy i mezi zimními a letními měsíci je pouze v tom, že se provozní stavy po výkonové křivce pohybují směrem k nule.



Obr 2.2 Výkonová křivka FVE

Data použitá v této práci k analýze toku výkonů a vybraných parametrů byla získána z naměřených hodnot konkrétní FVE nacházející se v Moravskoslezském kraji. Její výkonové poměry v daném dni jsou na obrázku 2.3. Lze si povšimnout klasického denního průběhu pro FVE, kdy téměř s východem slunce nabývá na účinnosti, kolem třinácté hodiny dosahuje svého maxima a se západem slunce přechází do nulového výkonu.



Obr 2.3 Výkonové poměry FVE v daném dni

Do matematického modelu v ATPDraw pro analýzu vymezené energetické soustavy byla FVE namodelována pomocí zdroje střídavého proudu (AC source). Nastavení jejích patřičných parametrů je na obrázku 2.4. Amplituda (AmplitudeA) a fázový posuv (PhaseAngleA) se vypočítávaly dle výkonu FVE a naměřených hodnot během dne.



Component: ACSOURCE

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Ampere	1171.655
Frequency	Hz	50
PhaseAngleA	degrees	-38.7464
StartA	sec	-1
StopA	sec	1000

NODE	PHASE	NAME
AC	ABC	X0080

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label: FVE

Comment:

Type of source: ☒ Current ☐ Voltage

Num phases: ☐ Single ☒ 3-phase ☐ 3*1-phase

Angle units: ☒ Degrees ☐ Seconds

Amplitude: ☒ Peak L-G ☐ RMS L-G ☐ RMS L-L

Grounding: ☒ Grounded ☐ Ungrounded

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Obr. 2.4 Vybraný prvek pro FVE a nastavení jeho parametrů v ATPDraw

2.2 Jednotlivé komponenty v síti

V této podkapitole jsou uvedeny matematické modely jednotlivých komponentů dané distribuční sítě a jejich patřičné nastavení parametrů v ATPDraw. Parametry jednotlivých komponentů jsou uvedeny v tabulkách.

2.2.1 Zdroj

V daném modelu je zdroj elektrické energie o napětí 110 kV zastoupen zdrojem střídavého napětí (AC source) s odpovídající amplitudou (AmplitudeA), frekvencí (Frequency) a odpovídajícím fázovým posuvem (PhaseAngleA). U tohoto zdroje se dá nastavit také zapínací (StartA) a vypínací (StopA) čas (Obr. 2.5). Jeho vnitřní impedance je zastoupena prvkem sériového RLC obvodu (RLC 3-ph), jehož hodnoty jsou vypočítány ze zkratového výkonu (700MVA) v místě připojení na přípojnici 110 kV (Obr. 2.6). Parametry zdroje jsou uvedeny v tabulce 2.1.

$$U_m = \frac{U_s \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = \frac{110000 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 89815V \quad (2.1)$$

$$I_{3k}'' = \frac{S_k''}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{700000000}{\sqrt{3} \cdot 110000} = 3,674kA \quad (2.2)$$

$$Z = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{3k}''} = \frac{110000}{\sqrt{3} \cdot 3674} = 17,286\Omega \quad (2.3)$$

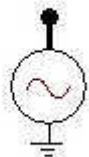
Dle normy ČSN EN 60909-0 lze pro případ síťových napáječů napájených venkovním vedením o jmenovitém napětí vyšším jak 35 kV uvažovat:

$$X = Z = 17,286\Omega \quad (2.4)$$

$$L = \frac{X}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{17,286}{314} = 55mH \quad (2.5)$$

Tab. 2.1 Parametry zdroje 110 kV

Parametry zdroje 110 kV								
Označení	Amplituda napětí (V)	Frekvence napětí (Hz)	Fázový posuv (deg)	Zap. čas (s)	Vyp. čas (s)	Odpor (Ω)	Indukčnost (mH)	Kapacita (μF)
G1	89815	50	0	-1	1000	0.00001	55	0



Component: ACSOURCE

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
AmplitudeA	Volt	89815	AC	ABC	X0010
Frequency	Hz	50			
PhaseAngleA	degrees	0			
StartA	sec	-1			
StopA	sec	1000			

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label: G1

Comment:

Type of source: ☐ Current ☒ Voltage

Num phases: ☐ Single ☒ 3-phase ☐ 3*1-phase

Angle units: ☒ Degrees ☐ Seconds

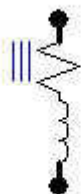
Amplitude: ☒ Peak L-G ☐ RMS L-G ☐ RMS L-L

Grounding: ☒ Grounded ☐ Ungrounded

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Obr. 2.5 Vybraný prvek pro zdroj 110 kV a nastavení jeho parametrů v ATPDraw



Component: RLC3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R_1	Ohms	1E-5	IN1	ABC	X0010
L_1	mH	55	OUT1	ABC	PB1
C_1	μF	0			
R_2	Ohms	1E-5			
L_2	mH	55			
C_2	μF	0			
R_3	Ohms	1E-5			
L_3	mH	55			

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output:

☐ Hide ☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Obr. 2.6 Vybraný prvek pro vnitřní impedanci zdroje 110 kV a nast. jeho parametrů v ATPDraw

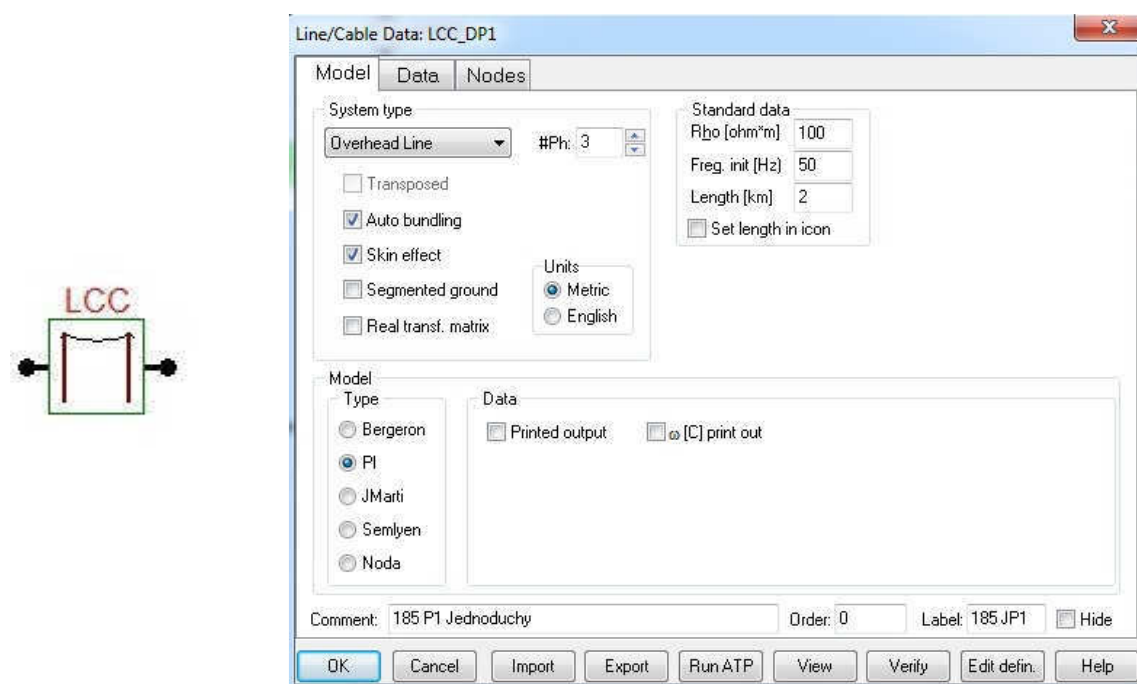
2.2.2 Vedení

Přenosové vedení 110 kV je modelováno pomocí prvku Line and Cable Constants (LCC). Pomocí tohoto prvku je možno vygenerovat požadovaný typ kabelového nebo venkovního vedení postupným zadáváním jednotlivých parametrů. V našem případě použijeme třífázové venkovní vedení (Overhead

Line) s respektovaným povrchovým jevem (Skin effect) v metrické soustavě (Metric). Pro vedení se soustředěnými parametry využijeme typ modelu PI (Obr. 2.7). K finálnímu vygenerování obvodových parametrů přenosového vedení je zapotřebí ještě zadat vzdálenosti umístění vodičů na stožáru a jejich parametry (Obr. 2.8).

Tab. 2.2 Parametry přenosového vedení 110 kV

Parametry vedení 110 kV						
Označení	Délka (km)	Typ vodičů	Typ stožáru	Odpor země ($\Omega \cdot \text{m}^{-1}$)	Frekvence (Hz)	Počet fází
V100	10	AlFe6 185	Jednoduchý	100	50	3



Obr. 2.7 Vybraný prvek pro přenosové vedení 110 kV a nastavení jeho parametrů v ATPDraw

Tab. 2.3 Parametry a umístění vodičů AlFe6 185

Parametry a umístění vodičů AlFe6 185						
Ph.no.	Rin (cm)	Rout (cm)	Resis ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	Horiz (m)	Vtower (m)	Vmid (m)
1	0.3175	0.85	0.2	-2.675	19.15	15.15
2	0.3175	0.85	0.2	2.675	17.4	13.4
3	0.3175	0.85	0.2	-3.75	13.45	9.45

Line/Cable Data: LCC_DP

ModelDataNodes

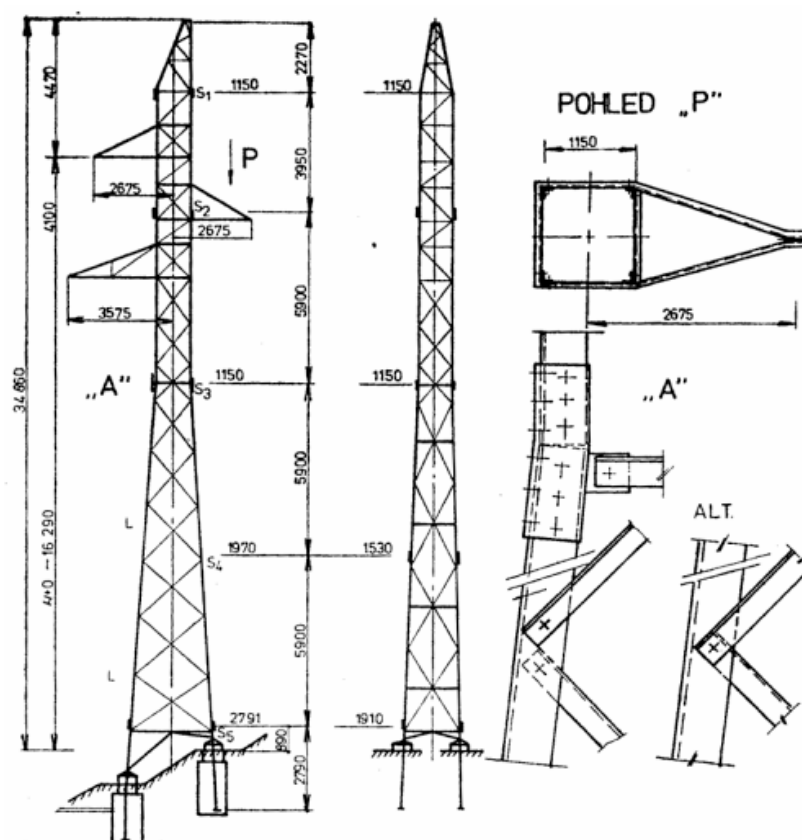
	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	0.3175	0.85	0.2	-2.675	19.15	15.15	0	0	0
2	2	0.3175	0.85	0.2	2.675	17.4	13.4	0	0	0
3	3	0.3175	0.85	0.2	-3.75	13.45	9.45	0	0	0

Add rowDelete last rowInsert row copy

Move

OKCancelImportExportRun ATPViewVerifyEdit defin.Help

Obr. 2.8 Nastavení parametrů a umístění vodičů AlFe6 185 v ATPDraw

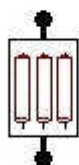


Obr 2.9 Nosný stožár jednoduchý 110 kV

Distribuční vedení 22 kV je modelováno pomocí prvku „ π článek“ (RLC Pi-equiv. 1). Pomocí tohoto prvku je možné vygenerovat kabelové vedení se soustředěnými parametry, které je charakterizováno činným odporem (R), reaktancí (X) a kapacitou (C). V našem případě se jedná o jednožilové distribuční kabely vysokého napětí 22-AXEKCY 12,7/22 (25) kV pro vnitřní i venkovní použití v třífázovém uspořádání, uložené v zemi.

Tab. 2.4 Parametry kabelů 22-AXEKCY 12,7/22 (25) kV

<i>Parametry kabelů 22-AXEKCY 12,7/22 (25) kV</i>					
<i>Kabel</i>	<i>Délka (m)</i>	<i>Průřez jádra (mm²)</i>	<i>Odpor ($\Omega \cdot m^{-1}$)</i>	<i>Reaktance ($\Omega \cdot m^{-1}$)</i>	<i>Kapacita ($\mu F \cdot m^{-1}$)</i>
V1	449	120	0.000253	0.000122	0.00033
V2	202	120	0.000253	0.000122	0.00033
V3	202	120	0.000253	0.000122	0.00033
V4	253	120	0.000253	0.000122	0.00033
V5	388	120	0.000253	0.000122	0.00033
V6	312	120	0.000253	0.000122	0.00033
V7	540	120	0.000253	0.000122	0.00033
V8	419	120	0.000253	0.000122	0.00033
V9	512	120	0.000253	0.000122	0.00033
V10	193	240	0.000125	0.000106	0.00044
V11	442	240	0.000125	0.000106	0.00044
V12	745	70	0.000433	0.00013	0.00027
V13	512	120	0.000253	0.000122	0.00033
V14	430	120	0.000253	0.000122	0.00033
V15	472	120	0.000253	0.000122	0.00033
V16	435	120	0.000253	0.000122	0.00033
V17	194	240	0.000125	0.000106	0.00044
V18	247	240	0.000125	0.000106	0.00044
V19	324	70	0.000433	0.00013	0.00027
V20	243	150	0.000206	0.000116	0.00036
V21	400	240	0.000125	0.000106	0.00044



Component: PI_CAB3S

Attributes:

DATA	UNIT	VALUE
R	Ohm/m	0.000253
X	Ohm/m	0.000122
C	μF/m	0.00033

NODE	PHASE	NAME
To	ABC	X0103
From	ABC	X0098

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label: V1

Comment: 22K_120_AXEKCXY

Lines:

Length: 449 [m] ☐ Hide

Output: No ☐ \$Vintage.1

Edit definitions OK Cancel Help

Obr. 2.10 Vybraný prvek pro kabelové vedení 22 kV a nastavení jeho parametrů v ATPDraw

2.2.3 Transformátory

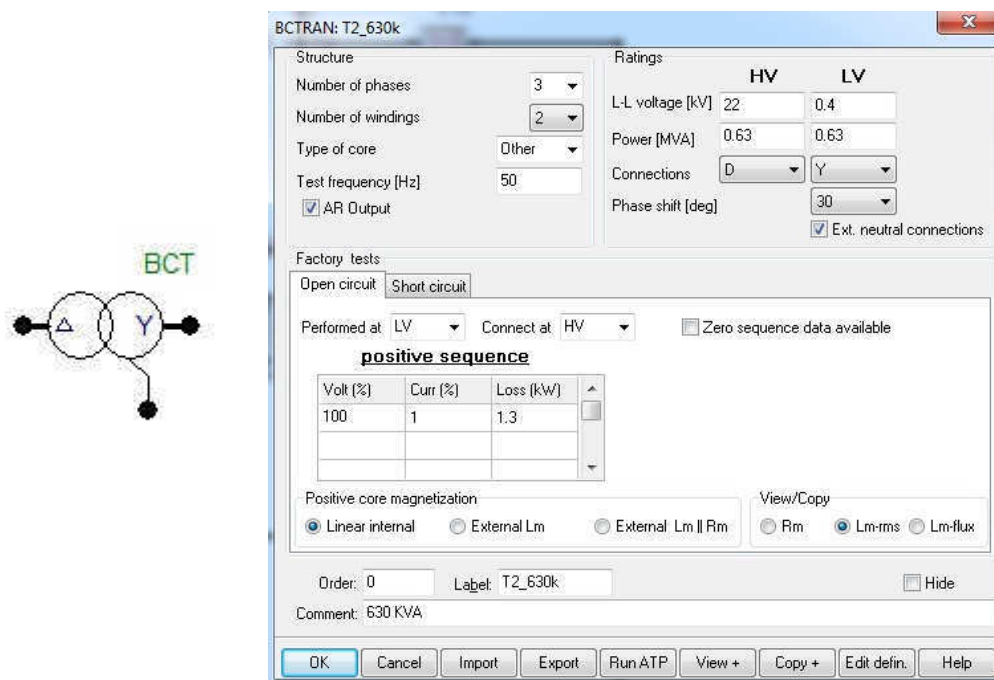
Transformátory v daném modelu distribuční sítě jsou modelovány pomocí prvku BCTRAN, který umožňuje vygenerovat parametry transformátoru na základě zadání jeho štítkových hodnot. V našem případě se jedná o třífázové dvouvinuťové transformátory s plášťovým jádrem (Other), testovací frekvencí 50 Hz a typem výstupní matice AR (AR Output). Štítkové a naměřené hodnoty jednotlivých transformátorů jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 2.5 Štítkové hodnoty transformátorů

Parametry transformátorů						
Označení	Typ	Jmenovitý výkon (MVA)	Primární napětí (kV)	Sekundární napětí (kV)	Zapojení	Fázový posun (deg)
T1	110/22 kV	10	110	22	Yd1	0
T2	22/0,4 kV	0,63	22	0,4	Dyn1	0
T3	22/0,4 kV	0,4	22	0,4	Dyn1	0
T4	22/0,4 kV	0,4	22	0,4	Dyn1	0
T5	22/0,4 kV	0,63	22	0,4	Dyn1	0
T6	22/0,4 kV	0,4	22	0,4	Dyn1	0
T7	22/0,4 kV	0,4	22	0,4	Dyn1	0
T8	22/0,4 kV	0,4	22	0,4	Dyn1	0
T9	0,4/22 kV	1,25	0,4	22	Dyn1	0

Tab. 2.6 Hodnoty transformátorů získané z měření naprázdno a nakrátko

Parametry transformátorů				
Transformátor	Napětí nakrátko (%)	Proud naprázdno (%)	Ztráty nakrátko (kW)	Ztráty naprázdno (kW)
T1	9.6	1	42	13
T2	4	1	8.4	1.3
T3	4	1	8.4	1.3
T4	4	1	6	0.93
T5	4	1	6	0.93
T6	4	1	8.4	1.3
T7	4	1	6	0.93
T8	4	1	6	0.93
T9	6	1	16	2.1

**Obr. 2.11** Vybraný prvek pro transformátory a nastavení jeho parametrů v ATPDraw

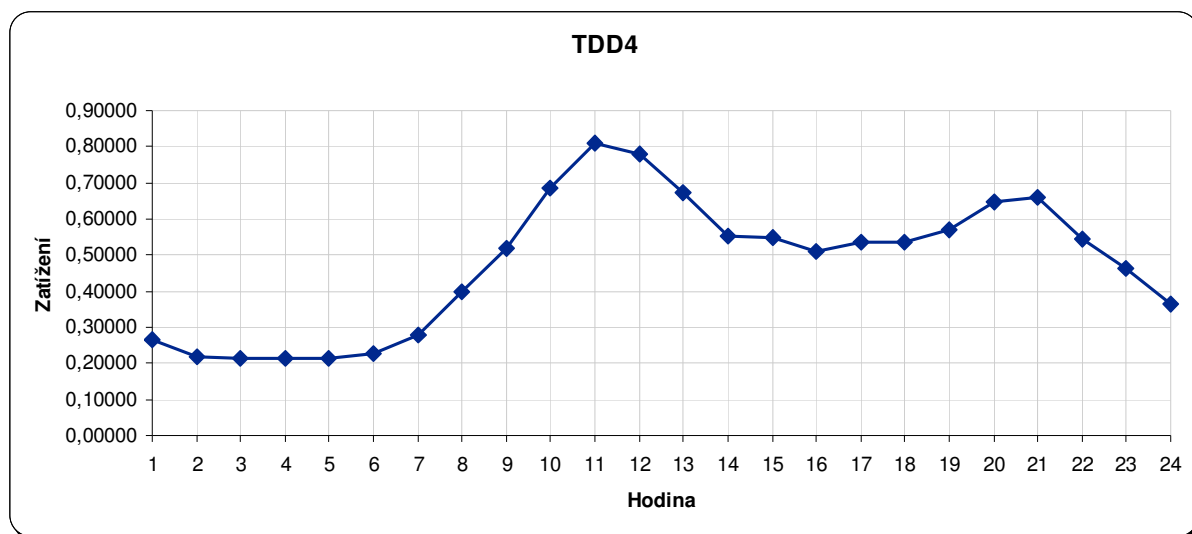
2.3 Diagram zatížení

Diagram zatížení vyjadřuje průběh spotřeby nebo výroby elektrické energie dané části elektrizační soustavy v určitém sledovaném období. Jedná se o diagramy zatížení denní (DDZ), týdenní (TDZ), měsíční (MDZ) a roční (RDZ). Průběhy zatížení jsou ovlivňovány např. klimatickými podmínkami, pracovní aktivitou, střídáním ročních období, střídáním pracovních a volných dnů, pracovní a nepracovní doby nebo také dne a noci [25].

Spotřeba energie se do značné míry odvíjí od typu dne (všední, víkend, svátky apod.) a od denní doby. Obecně se dá říci, že v noci je nižší, kdy minima dosáhne kolem čtvrté hodiny ranní. Prudký nárůst začíná od sedmi hodin ráno. Ve většině případů se objevují během dne dvě špičky. Kolem oběda a potom kolem jednadvacáté hodiny. Mezi těmito dobami je spotřeba energie relativně konstantní. Po jednadvacáté hodině většinou klesá. Průběh křivky DDZ je obdobný během celého roku, jen velikost spotřeby se v závislosti na výše uvedených faktorech mění.

Na základě skutečných měření podle charakteru zátěže jsou vytvářeny tzv. typové denní diagramy (TDD). Obchodník na trhu s elektřinou posuzuje denní diagramy z pohledu regionálního (v jednotlivých krajích) a celorepublikového. Analyzován je tvar křivky spotřeby podle definovaného charakteru zátěže:

- Podnikatel - odběr bez tepelného využití elektřiny - TDD č. 1
- Podnikatel - odběr s akumulacním spotřebičem - TDD č. 2
- Podnikatel - odběr s hybridním vytápěním - TDD č. 2
- Podnikatel - odběr s přímotopným systémem vytápění - TDD č. 3
- Podnikatel - odběr s tepelným čerpadlem - TDD č. 3
- Domácnost - odběr bez tepelného využití elektřiny - TDD č. 4
- Domácnost - odběr s akumulacním spotřebičem - TDD č. 5
- Domácnost - odběr s hybridním vytápěním - TDD č. 6
- Domácnost - odběr s přímotopným systémem vytápění - TDD č. 7
- Domácnost - odběr s tepelným čerpadlem - TDD č. 7
- Podnikatel - odběr pro veřejné osvětlení - TDD č. 8



Obr 2.12 Typový diagram dodávky elektřiny

Na obrázku 2.12 je typový diagram dodávky elektřiny v poměrných hodnotách z 29. 3. 2014, který je v této práci dále využitý pro analýzu toků výkonů ve vyhrazené elektrizační soustavě. Jelikož se jedná o soustavu odpovídající městské aglomeraci, lze použít TDD4, to znamená typový diagram dodávky elektřiny pro domácnost bez tepelného využití elektřiny.

3. ANALÝZA TOKU VÝKONU A VYBRANÝCH PARAMETRŮ

V této poslední kapitole je provedena analýza ustáleného a přechodného chodu sítě v simulačním prostředí ATPDraw programu ATP-EMTP. Aby bylo možné provést výpočet, je třeba znát konfiguraci sítě: rozvodny (napěťové hladiny, zkratové výkony), transformátory, vedení (typy vedení, délky, atd.), odběry (činné a jalové odběry) a v neposlední řadě také parametry připojovaného zdroje (FVE). Všechny zmiňované parametry pro konfiguraci sítě byly zadány do sestaveného schématu v ATPDraw v rámci předchozí kapitoly. Na základě těchto vstupních hodnot se provedl výpočet před a po připojení nového zdroje a oba výpočty se porovnaly.

Do zátěže každého odběrného místa, tedy transformátoru, byly zadávány hodnoty odporů a indukčností. Šlo o násobky poměrné hodnoty jednotlivé hodiny s jmenovitým výkonem každého transformátoru, při respektování maximálního zatížení transformátorů (60% jmenovitého výkonu transformátoru) a účinníku.

3.1 Analýza ustáleného chodu soustavy

ATPDraw provedl výpočet ustáleného chodu sítě pro odběrné body (OB1 – OB7) a předávací bod (PB1) viz obrázek 2.1, bez příspěvku dodávky elektrické energie z FVE. Byly provedeny následující výpočty:

- okamžité průběhy napětí a proudů OB a PB1
- výpočty efektivních hodnot napětí a proudů v OB
- výpočty výkonů v OB a PB1.

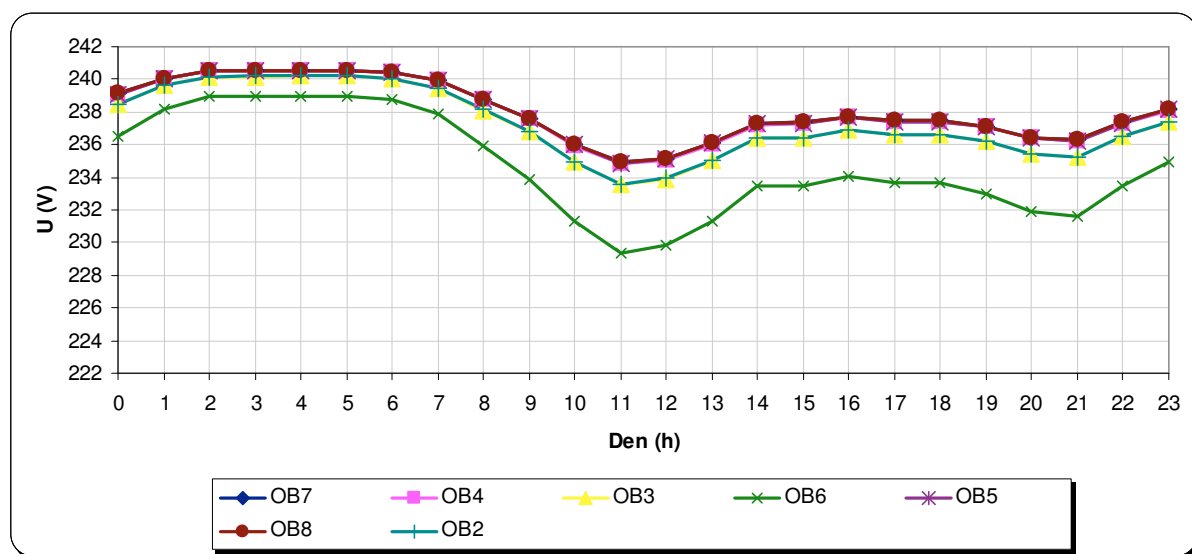
Cílem této analýzy bylo nalézt OB s nejnižší hodnotou napětí v průběhu jednoho dne při časovém kroku jedné hodiny. Pro OB s nejnižší hodnotou napětí provést výpočet napětí v celém rozsahu nn sítě a opět nalézt místo s nejnižší hodnotou napětí pro jeden den s časovým krokem jedné hodiny. Dále bylo cílem výpočet toku výkonu v OB a PB1.

Následně se do místa OB s největším poklesem napětí na nn straně připojí FVE. Proveďte se výpočet ustáleného toku soustavy s jejím příspěvkem a nakonec dojde ke srovnání všech výše zmíněných parametrů

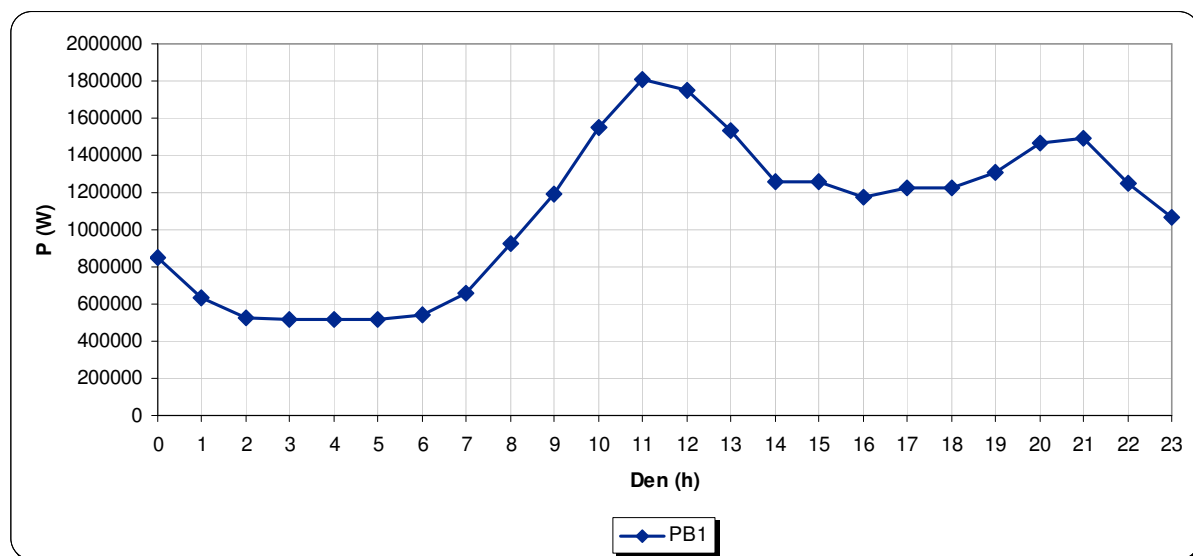
3.1.1 Analýza ustáleného chodu soustavy bez připojené FVE

Tab. 3.1 Hodnoty fázového napětí v OB a výkonu v PBI bez připojené FVE

Hodina	Hodnota fázového napětí na sekundární straně transformátoru (0,4 kV) bez připojené FVE							Činný výkon
	OB7 (V)	OB4 (V)	OB3 (V)	OB6 (V)	OB5 (V)	OB8 (V)	OB2 (V)	PB1 (W)
0	239,11	239,07	238,50	236,50	239,08	239,12	238,51	851012,704
1	240,05	240,02	239,62	238,14	240,04	240,06	239,63	630562,43
2	240,52	240,50	240,16	238,92	240,51	240,52	240,17	523128,334
3	240,54	240,52	240,19	238,96	240,53	240,54	240,19	518360,106
4	240,56	240,54	240,21	238,99	240,55	240,56	240,21	513707,803
5	240,56	240,54	240,21	238,99	240,55	240,56	240,21	513707,803
6	240,44	240,42	240,08	238,81	240,43	240,45	240,08	540518,049
7	239,93	239,90	239,47	237,92	239,91	239,94	239,48	660076,162
8	238,79	238,74	238,13	235,87	238,76	238,80	238,14	927710,574
9	237,62	237,55	236,78	233,88	237,57	237,62	236,79	1,19E+06
10	236,04	235,95	234,94	231,30	235,97	236,05	234,96	1,55E+06
11	234,91	234,81	233,59	229,37	234,83	234,93	233,61	1,81E+06
12	235,17	235,07	233,90	229,80	235,09	235,18	233,92	1,75E+06
13	236,14	236,05	235,05	231,33	236,07	236,15	235,06	1,53E+06
14	237,31	237,24	236,43	233,45	237,26	237,32	236,45	1,26E+06
15	237,35	237,27	236,44	233,45	237,29	237,35	236,45	1,26E+06
16	237,72	237,65	236,86	234,07	237,67	237,73	236,87	1,17E+06
17	237,47	237,40	236,58	233,67	237,42	237,48	236,60	1,23E+06
18	237,47	237,40	236,58	233,67	237,42	237,48	236,60	1,23E+06
19	237,13	237,05	236,19	233,01	237,07	237,14	236,21	1,31E+06
20	236,45	236,36	235,39	231,93	236,39	236,46	235,41	1,46E+06
21	236,28	236,19	235,26	231,64	236,21	236,29	235,27	1,49E+06
22	237,38	237,31	236,50	233,47	237,33	237,39	236,52	1,25E+06
23	238,17	238,11	237,40	234,91	238,13	238,18	237,41	1,07E+06



Obr 3.1 Hodnoty fázového napětí v OB bez připojené FVE

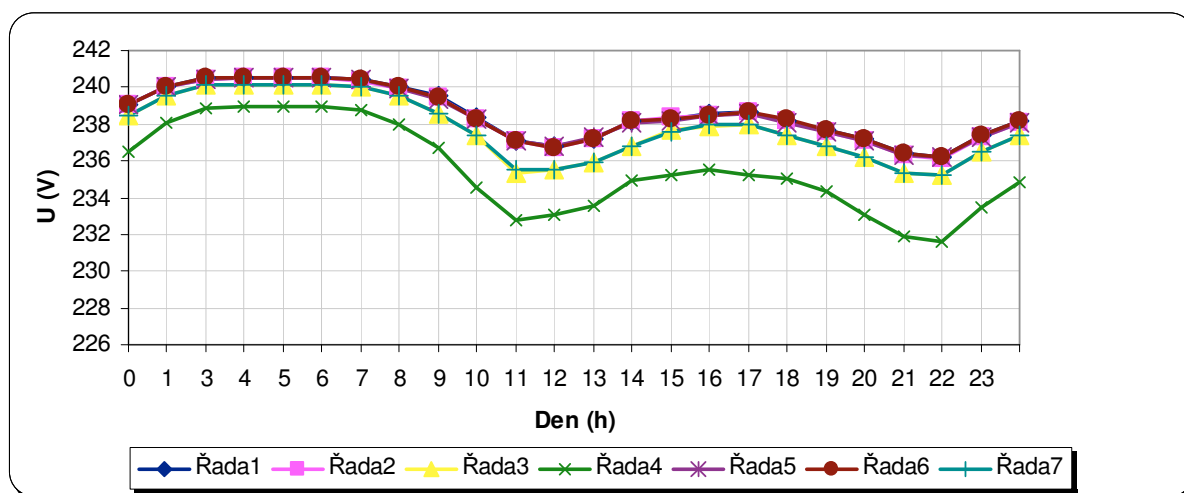


Obr 3.2 Činný výkon v PB1 bez připojené FVE

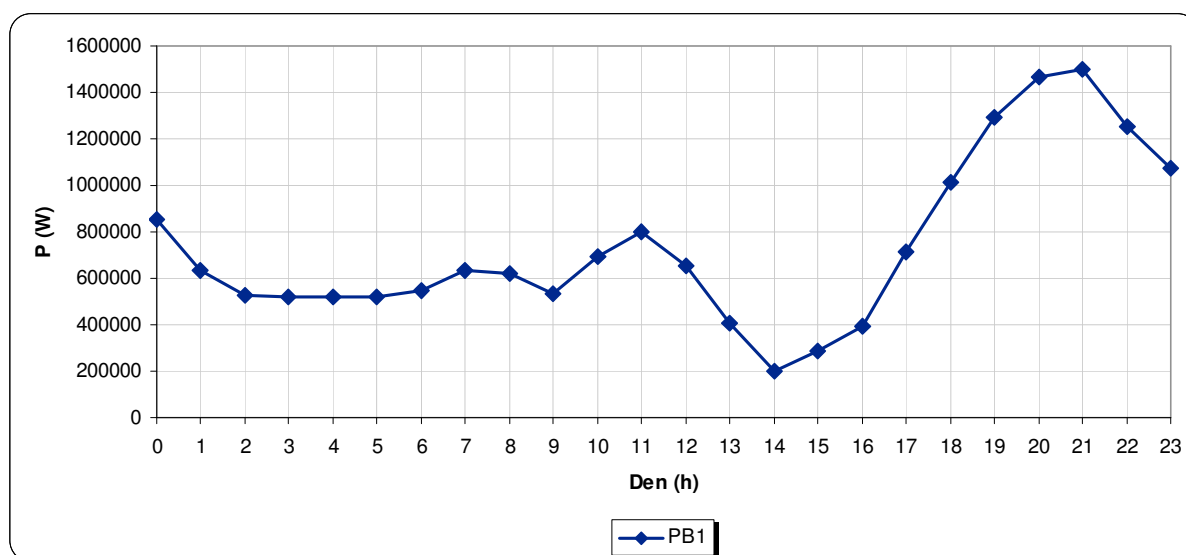
3.1.2 Analýza ustáleného chodu soustavy s připojenou FVE

Tab. 3.2 Hodnoty fázového napětí v OB a výkonu v PB1 s připojenou FVE

Hodina	Hodnota fázového napětí na sekundární straně transformátoru (0,4 kV) s připojenou FVE							Činný výkon
	OB7 (V)	OB4 (V)	OB3 (V)	OB6 (V)	OB5 (V)	OB8 (V)	OB2 (V)	PB1 (W)
0	239,08	239,03	238,46	236,46	239,05	239,08	238,47	855630,3
1	240,02	239,99	239,59	238,1	240	240,02	239,59	635256
2	240,49	240,46	240,13	238,88	240,47	240,49	240,13	527697,4
3	240,5	240,48	240,15	238,92	240,49	240,51	240,16	522930,8
4	240,52	240,5	240,17	238,95	240,51	240,53	240,18	518280,1
5	240,52	240,5	240,17	238,95	240,51	240,53	240,18	518280,1
6	240,41	240,38	240,04	238,77	240,39	240,41	240,05	545081,1
7	240	239,97	239,54	238	239,98	240	239,55	632559,3
8	239,5	239,4	238,56	236,71	239,35	239,4	238,56	622145,5
9	238,35	238,31	237,37	234,55	238,27	238,27	237,41	534229,1
10	237,06	237,1	235,37	232,8	237,14	237,1	235,49	695202,8
11	236,8	236,71	235,49	233,02	236,75	236,71	235,53	7,98E+05
12	237,15	237,2	235,96	233,57	237,32	237,2	235,96	653836,1
13	238,15	238,21	236,84	234,93	238,12	238,21	236,84	407359,7
14	238,25	238,37	237,72	235,06	238,2	238,26	237,63	198453,8
15	238,58	238,47	237,85	235,48	238,47	238,51	237,94	287053
16	238,66	238,65	238	235,2	238,6	238,69	237,94	391718,1
17	238,22	238,16	237,37	235,02	238,12	238,25	237,37	710997,8
18	237,64	237,61	236,76	234,31	237,59	237,65	236,77	1,01E+06
19	237,17	237,1	236,23	233,06	237,12	237,18	236,25	1,29E+06
20	236,41	236,33	235,35	231,9	236,35	236,42	235,37	1,47E+06
21	236,24	236,15	235,22	231,6	236,18	236,25	235,24	1,50E+06
22	237,35	237,28	236,47	233,43	237,3	237,36	236,48	1,25E+06
23	238,14	238,08	237,36	234,87	238,1	238,15	237,38	1,07E+06



Obr 3.3 Hodnoty fázového napětí v OB s připojenou FVE



Obr 3.4 Činný výkon v PB1 s připojenou FVE

3.2 Analýza vlivu FVE na vybrané parametry distribuční soustavy

Vyhodnocení analýzy ustáleného chodu soustavy z obrázku 2.1 můžeme vidět v tabulce 3.1 a jejich grafickou interpretaci na obrázku 3.1.

3.2.1 Analýza napětí

Z grafu na obrázku 3.1 a 3.2 lze vyčíst místo v soustavě s nejnižší hodnotou výstupního napětí na straně nn. Tedy místo pro připojení FVE bylo na základě předchozích výsledků zvoleno OB6, což je místo s nejnižší hodnotou napětí v průběhu jednoho dne. Pro analýzu byl vybrán provozní režim FVE

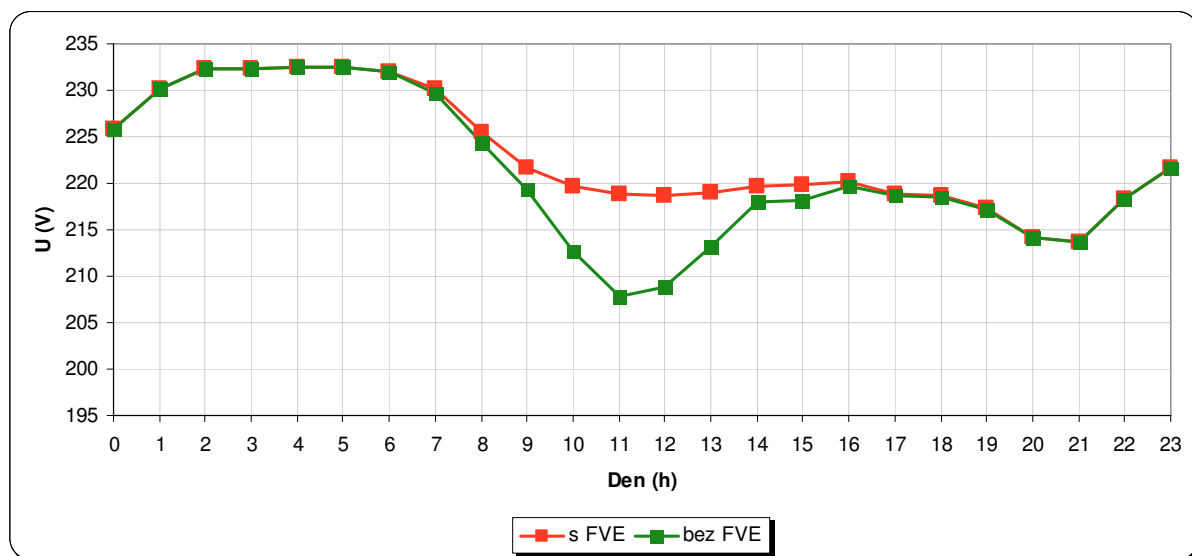
s maximální dotací sluneční energie dle výkonové křivky na obrázku 2.1. Výsledné hodnoty všech výše zmíněných sledovaných parametrů jsou interpretovány na obrázku 3.3. Pro tento odběrný bod byla následně provedena podrobná analýza napěťových a proudových poměrů všech jeho vývodů na hladině nn a opět nalezen uzlový bod na hladině nn s nejnižší hodnotou fázového napětí.

Povolené limity hodnot napětí pro hladinu nn dle ČSN EN 50160 ed.3 (10% U_N). Výsledky analýzy napěťových poměrů na všech vývodech v OB6 s nejnižší hodnotou napětí v průběhu jednodneho dne jsou prezentovány v tabulce 3.3. Červenou barvou je vyznačeno překročení 10% tolerance oproti jmenovité hodnotě povoleného napětí. Z tabulky je zřejmé překročení povolených napěťových poměrů pro jedenáctou hodinu, kdy je největší odběr elektrické energie. S připojením FVE jde vidět podstatná změna napětí v OB6 a tedy i eliminace výskytu napětí mimo stanovené limity dané normou.

Výsledek je na obrázku 3.5. Z tohoto srovnání vyplývá, že FVE pozitivně ovlivňuje hodnotu napětí v místě připojení.

Tab. 3.3 Hodnoty fázového napětí v OB6

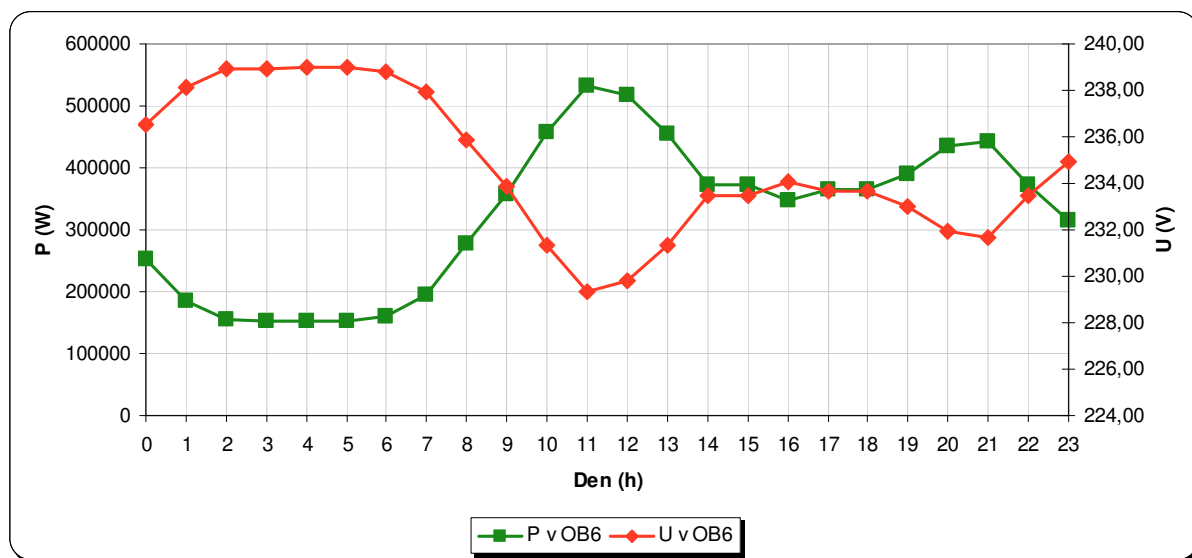
Hodnota napětí v OB6 (V)		
Hodina	bez FVE	s FVE
0	225,83	225,82
1	230,16	230,15
2	232,32	232,31
3	232,41	232,4
4	232,5	232,5
5	232,51	232,5
6	231,96	231,95
7	229,59	230,1
8	224,41	225,58
9	219,32	221,7
10	212,59	219,7
11	207,83	218,8
12	208,9	218,7
13	213,11	219
14	218,01	219,73
15	218,13	219,77
16	219,7	220,19
17	218,59	218,86
18	218,55	218,71
19	217,24	217,31
20	214,15	214,14
21	213,61	213,61
22	218,29	218,28
23	221,63	221,62



Obr 3.5 Poměry napětí v OB6

3.2.2 Analýza toku výkonu

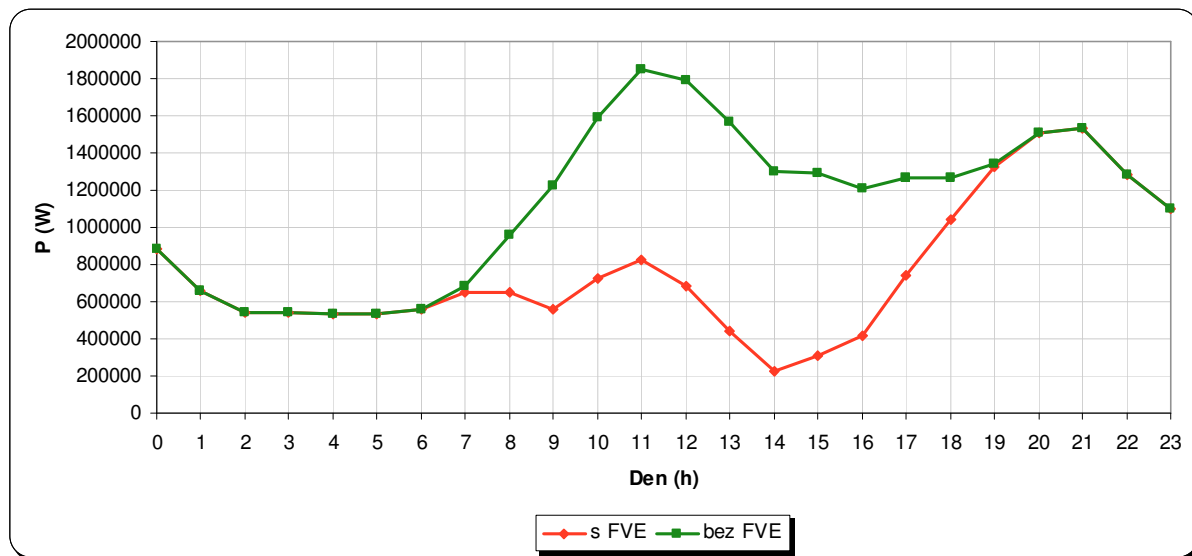
Jelikož změna napětí v distribučních sítích nastává obecně v důsledku změny výkonů připojených zdrojů a změnami odebíraných výkonů u odběratelů (obr. 3.3), tak se dá očekávat korespondence s typovým diagramem denního zatížení (TDDZ).



Obr 3.6 Vliv dodávaného výkonu na napěťovou změnu v místě připojení FVE (KB1)

U každého energetického zdroje se sledují dodávky činného a jalového výkonu. Z dodávek je potom patrné jak energetický zdroj dodával do sítě nebo odebíral ze sítě energii. Dodávka výkonu do distribuční sítě byla měřena v PB1 na napěťové hladině 110 kV. Další měření bylo provedeno na

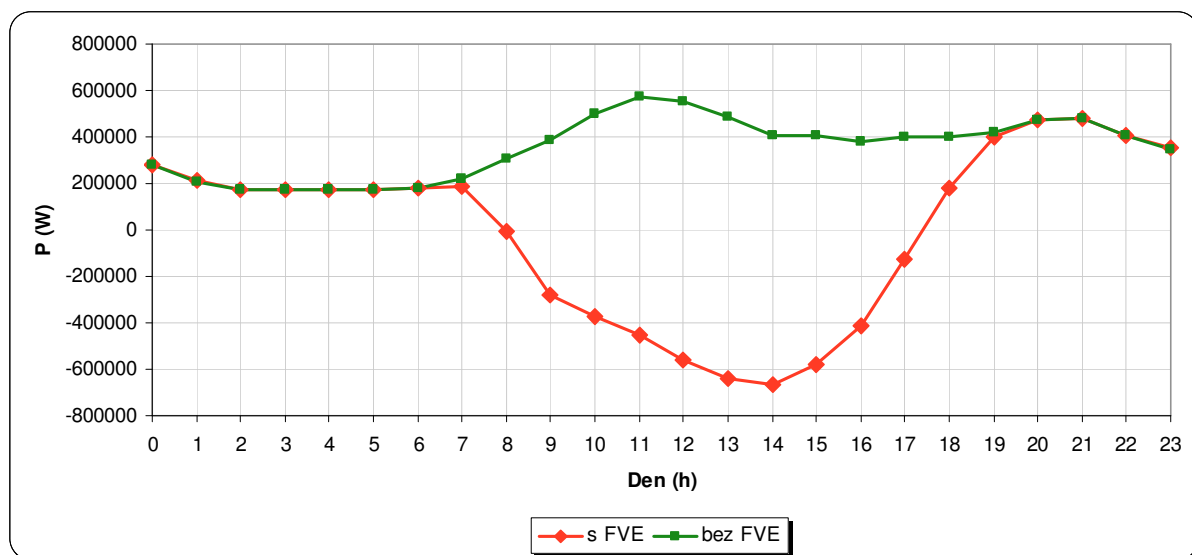
napětíové hladině 22 kV v místě připojení FVE, kde byl změřen dodávaný výkon z FVE do distribuční sítě.



Obr 3.7 Poměry výkonů v PB1 s příspěvkem FVE

Z grafu na obrázku 3.7 lze vyčíst, jak se mění hodnota výkonu dodávaná ze sítě 110 kV v závislosti na příspěvku výkonu z FVE v jejím pracovním režimu.

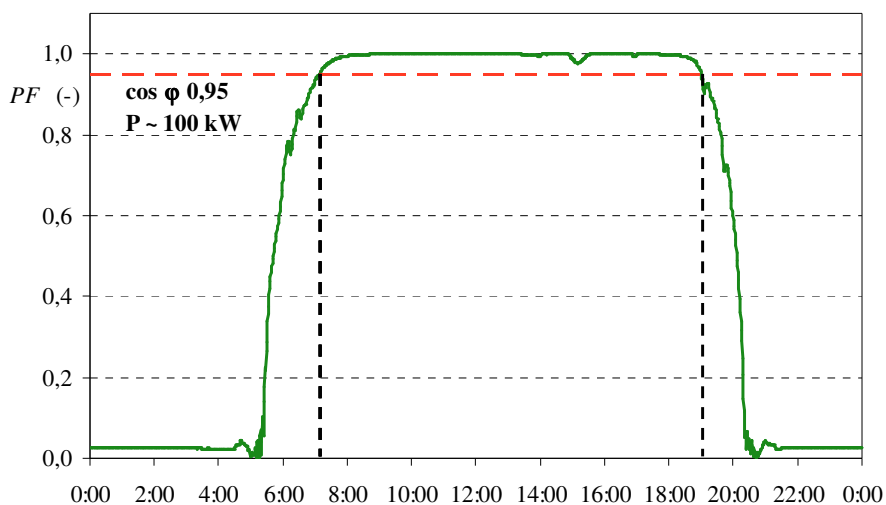
V PB1 je patrné snížení toku činného výkonu v okamžiku, kdy je FVE hrazena část spotřeby v distribuční soustavě 22 kV bez žádného přetoku zbytkového činného výkonu do nadřazené soustavy 110 kV.



Obr 3.8 Srovnání výkonů v místě připojení FVE (KB1)

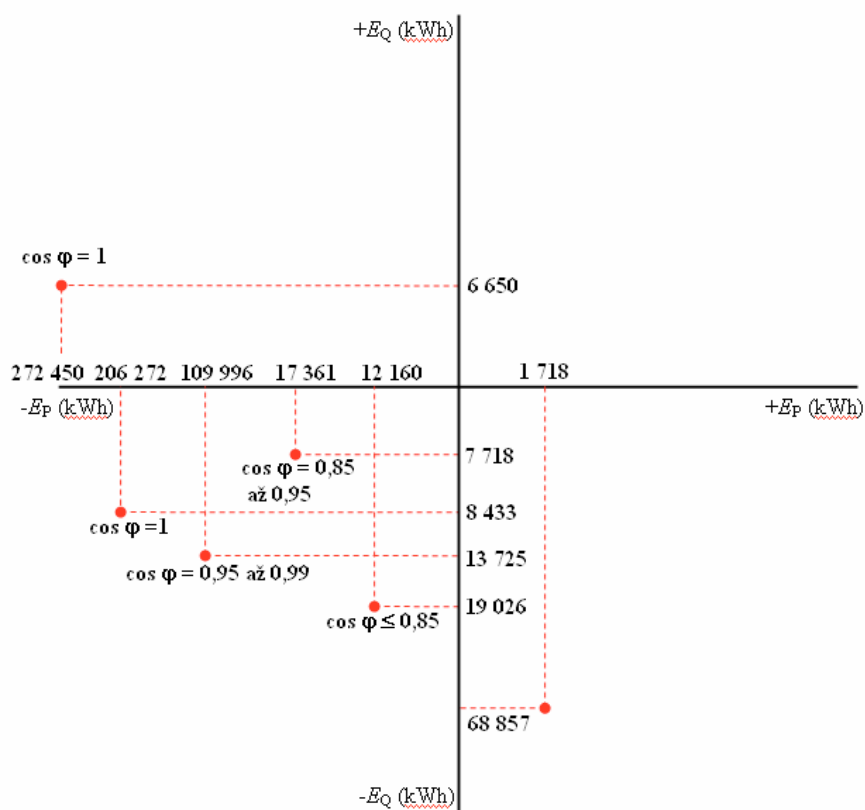
FVE umožňuje dodávku činného výkonu do elektrizační soustavy jak při brzkých ranních, tak i podvečerních hodinách s ohledem na meteorologické podmínky. Na obrázku 3.9 je vidět, že FVE

dodává dříve než v šest hodin ráno. Není ale dodrženo neutrální pásmo činitele výkonu. V neutrálním pásmu účinníku 0,95 - 1 začíná dodávat až o půl osmé při odpovídající hodnotě činného výkonu kolem 100 kW a končí dodávat kolem sedmé hodiny večerní.



Obr 3.9 Hodnoty činitele výkonu FVE během dne

Na obrázku je zobrazen režim odběru induktivního jalového výkonu (+Q), ale FVE umožňuje i provoz v režimu dodávky induktivního jalového výkonu (-Q).



Obr 3.10 PQ diagram FVE

Z obrázku 3.10 si můžeme povšimnout, že provoz fotovoltaické elektrárny je definován pro tři základní stavy:

- dodávka činného výkonu (-P) a dodávka induktivního jalového výkonu (-Q),
- dodávka činného výkonu (-P) a odběr induktivního jalového výkonu (+Q),
- odběr činného výkonu (+P) a odběr induktivního jalového výkonu (+Q).

A právě vliv režimu FVE (-P, -Q) je zřejmý z výsledků napěťové analýzy, kde je potvrzeno navýšení napětí v analyzovaném uzlu s nejmenší hodnotou napětí na vývodu OB6, které má za následek eliminaci výskytu napětí mimo stanovené limity dle ČSN EN 50160 ed.3.

ZÁVĚR

Fotovoltaická elektrárna je charakteristická velmi rychlými změnami výroby energie, které závisí nejen na denním období, ale také na pokrytí oblohy oblačností. Při plném slunečním svitu může, zejména u vyššího počtu malých zdrojů (např. rozptýleně instalovaných na rodinných domcích ve vesnici), docházet k přetoku energie na vyšší napěťovou hladinu, pokud není dostatečný odběr domácností ze sítě. Velké FVE o výkonu řádově až MW mají na elektrizační soustavu již větší vliv. Rychlé změny výkonu mohou mít za následek kolísání napětí v místě připojení, větší počet těchto elektráren v oblasti s výhodnými podmínkami pak bude vyžadovat stavbu nových vedení. Tyto inovace však zasáhnou do stávající struktury ES a nesou sebou výhody i nevýhody, které mohou být výzvami k dalšímu vývoji. Jednou z možností, jak posoudit realizovatelnost využití obnovitelného potenciálu, je porovnat celkový výkon těchto zdrojů v různých obdobích s diagramem spotřeby energie.

Cílem diplomové práce bylo vytvořit matematický model vymezené energetické soustavy konceptu Smart Grids a v něm analyzovat výkonové a napěťové poměry při připojení fotovoltaické elektrárny.

V práci jsem hodnotil vliv vybraného zástupce obnovitelných zdrojů na parametry distribuční soustavy. Z obnovitelných zdrojů byla vybrána fotovoltaická elektrárna s instalovaným výkonem 1,1MWp, která byla připojena na hladinu 22 kV prostřednictvím výkonového transformátoru 0,69/22 kV. Výchozí schéma bylo sestaveno na základě zadání vedoucího diplomové práce, přičemž se přibližují skutečnému stavu elektrizační soustavy. Mezi základní parametry, které byly sledovány, patří napěťové poměry v odběrných bodech a výkonová bilance v předávacím bodě a v bodě připojení FVE k elektrizační soustavě. Analýza byla provedena s podporou simulačního nástroje EMTP-ATP při využití jeho grafického prostředí ATPDraw pro dva základní režimy, a to bez připojení FVE a s připojením FVE. Výše zmíněné parametry analyzované soustavy byly vypočteny pro jednodenní interval s časovým krokem 1 hodiny.

V prvním kroku jsem identifikoval místo s největším úbytkem napětí s cílem zlepšit hodnotu tohoto napětí. V bodě s největším úbytkem napětí se provedla podrobnější analýza na straně nn a opět se hledal bod s největším úbytkem napětí. Do něj jsem připojil FVE a měřil vliv výkonu FVE na napěťové poměry v tomto bodě. Z měření vyplynulo, že v pracovním cyklu FVE dochází k pozitivní změně napětí v tomto bodě. Dále byla provedena analýza výkonových poměrů jak v předávacím bodě, tak v bodě připojení FVE. Z analýzy jsou patrné poměry toku výkonu v předávacím bodě. Je zjevné snížení toku činného výkonu v okamžiku, kdy je FVE hrazena část spotřeby v distribuční soustavě 22 kV s žádným přetokem zbytkového činného výkonu do nadřazené soustavy 110 kV.

Z analýzy výkonových poměrů v této práci vyplývá, že možností regulace napětí v uzlech elektrizační soustavy, je regulace jalového výkonu. Proto musí FVE obsahovat regulátory jalového výkonu, aby byly schopny při určitém činném výkonu dodávat i výkon jalový, nebo aby byly schopny dodávat pouze výkon jalový. Tyto regulátory jalového výkonu se zapojují do systému dispečerského řízení. Tak, aby si síť sama efektivně poradila s touto regulací, lze využít už zmiňovaného systému Smart Grids. V návaznosti na tento systém je nutnost osadit FVE akumulární jednotkou. To ale už není náplní této práce. Dle mého názoru je problematika akumulace elektrické energie velice rozsáhlá a mohla by tak obsáhnout další diplomovou práci.

Co se týká samotné struktury práce, první část obsahuje seznámení se současnou problematikou elektrizační soustavy a systémem SMART GRIDS, s fotovoltaickou elektrárnou a analýzou zpětných vlivů OZE na distribuční soustavu. Ve druhé části je zpracován návrh a vývoj matematického modelu

v prostředí ATPDraw. Jsou zde popsány modely jak FVE, tak jednotlivých součástí soustavy a jejich potřebná nastavení. Třetí část je věnována analýze toku výkonu a vybraných energetických parametrů.

Přínos diplomové práce je v možnosti namodelovat a analyzovat instalaci FVE do vymezené elektrizační soustavy a rozhodnout tak o jejím co nejefektivnějším připojení v rámci vymezené energetické soustavy pro požadavky Smart Grids.

Použitá literatura

- [1] NOHÁČOVÁ, L. a MERTLOVÁ, J. *Electrical substations and lines*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010. 166 s. ISBN 978-80-7300-265-7.
- [2] SLUIS VAN DER, L.: *Transients in powersystems*. England: John Wiley&Sons Ltd., 2001. ISBN 0-471-48639-6.
- [3] TROJÁNEK, Z. a kol. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987.
- [4] TOMAN, P. a kol. *Provoz distribučních soustav*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [5] MASTNÝ, P. a kol. *Obnovitelné zdroje energie*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [6] MIŠÁK, S. a kol. Provoz větrných elektráren s měniči frekvence. *ELEKTRO*, 2008, č. 10, s. 4 – 8.
- [7] *Pravidla provozování distribučních soustav*. Příloha 4. Energetický regulační úřad, 2011.
- [8] TLUSTÝ, J. a kol. *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.
- [9] *Smart grids*. ABBreview, 2010, č. 1. ISSN 1013-3119.
- [10] MOTLÍK, J. a kol. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice*. 1. vyd. Praha: ČEZ, 2007.
- [11] LUKÁČ, P., RŮŽIČKOVÁ, B., ZELENKA, R. (red.). *Energyoutlook 2013*. Economia, a. s., 2013.
- [12] TLUSTÝ, J. a kol. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [13] BORKOVEC, J., ROUBAL, J. *Strategická výzkumná agenda 2012*. Česká technologická platforma Smart Grid, 2010.

Normy

- [14] PNE 33 3430-0: *Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav*.
- [15] PNE 33 3430-1: *Parametry kvality elektrické energie - Část 1: Harmonické a mezipharmonické*.
- [16] PNE 33 3430-2: *Parametry kvality elektrické energie - Část 2: Kolísání napětí*.
- [17] PNE 33 3430-6: *Parametry kvality elektrické energie - Část 6: Omezení zpětných vlivů na hromadné dálkové ovládání*.
- [18] ČSN EN 50160 ed. 3:2011. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*.

Internetové zdroje

- [19] Elektromobilita ČEZ. [online]. [cit. 2014-2-2] Dostupný z WWW: <www.elektromobilita.cz>.
- [20] Czech RE Agency. *Fotovoltaika pro každého*. [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>>.
- [21] TZB-info. *Obnovitelné zdroje energie v roce 2012 – 3. Část*. [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupný z WWW: <<http://oze.tzb-info.cz/11053-obnovitelne-zdroje-energie-v-roce-2012-3-cast>>.
- [22] Isolar. [online]. [cit. 2014-04-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.isolar.cz/technologie.html>>
- [23] Zpravodaj OEZ. *Ochranné a spínací přístroje fotovoltaických zdrojů*. [online]. [cit. 2014-04-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.oez.cz/file/404>>.

- [24] *Smart Grids. Chytré sítě.* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.futuremotion.cz>>.
- [25] TYRBACH, J. *Základní elektrárenské pojmy.* [online], [cit. 2014-04-23]. Dostupný z WWW: <http://web.telecom.cz/tyrbach/Zakladni_elektr_pojmy.pdf>.

Seznam citací

- [26] TLUSTÝ, J. a kol. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav.* 1. vyd. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04940-2, s. 40.
- [27] TLUSTÝ, J. a kol. *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí.* 1. vyd. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6, s. 11.
- [28] MASTNÝ, P. a kol. *Obnovitelné zdroje energie.* 1. vyd. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2, s. 83.